

## تأثیر شاخص انبساط آزاد بر بهبود تخمین منحنی رطوبتی خاک

شبنم جوانشیر<sup>1</sup>، حسین بیات<sup>2\*</sup>

تاریخ دریافت: 94/07/24 تاریخ پذیرش: 94/10/13

1 - دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا- همدان

2- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا- همدان

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

### چکیده

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با استفاده از تخمین‌گرهای متعدد تخمین می‌زنند. هدف این تحقیق بررسی تأثیر استفاده از شاخص انبساط آزاد به‌عنوان تخمین‌گر در بهبود تخمین منحنی رطوبتی خاک (SMC) بود. در این تحقیق تعداد 147 نمونه خاک از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، مازندران، همدان و کرمانشاه تهیه و منحنی SMC، توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری، شاخص انبساط آزاد و گنجایش تبادل کاتیونی آن‌ها تعیین گردید. سپس مدل گرنوالت و گرنت بر داده‌های تجربی SMC برازش شد. برای پیش‌بینی پارامترهای مدل گرنوالت و گرنت با روش رگرسیون چند متغیره از شاخص انبساط آزاد و سایر متغیرها به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شد. کل نمونه‌ها به چندین گروه بر اساس کلاس‌های بافتی تقسیم شدند و SMC برای آن‌ها در چهار مرحله تخمین زده شد. گروه‌بندی داده‌ها باعث بهبود معنی‌دار دقت تخمین‌ها شد. در گروه‌های بافتی شماره 3 (کلاس‌های لوم رسی و لوم رسی سیلتی) مقدار انتگرال ریشه دوم میانگین مربعات خطا (IRMSE) از 0/07 به 0/06 و مقدار معیار اطلاعات اکایک (AIC) از 77/85 به 72/28، در گروه بافتی شماره 7 (کلاس لوم شنی) مقدار IRMSE از 0/05 به 0/04 و مقدار AIC از 1/63 به 61/78- و در گروه بافتی شماره 8 (کلاس‌های شنی، شن لومی و لوم شنی) مقدار IRMSE از 0/06 به 0/05 و مقدار AIC از 86/11 به 2/97 کاهش یافتند. بنابراین در گروه‌های فوق استفاده از شاخص انبساط آزاد به‌عنوان تخمین‌گر موجب بهبود معنی‌دار دقت تخمین SMC از طریق مدل گرنوالت و گرنت شد.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، گنجایش تبادل کاتیونی، مدل گرنوالت و گرنت

## The Influence of Free Swelling Index on Improvement of the Soil Moisture Curve Estimation

Sh. Javanshir<sup>1</sup>, H. Bayat<sup>\*2</sup>

Received: 16 October 2014 Accepted: 3 January 2016

<sup>1</sup>- Former M. Sc. Student, Dept. of Soil Science, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>- Assist. Prof., Dept. of Soil Science, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

\*Corresponding Author, Email: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

### Abstract

Researchers estimate hydraulic properties by indirect methods using various procedures. The objective of this study was to evaluate the effect of using the free swelling index as an estimator to improve the precision of soil moisture curve (SMC) estimation. In this study, 147 soil samples were taken from West Azarbaijan, East Azarbaijan, Mazandaran, Hamedan and Kermanshah provinces, and their particle size distribution, bulk density, free swelling index, cation exchange capacity and SMC were determined. Then, the Groenevelt & Grant's model was fitted to the experimental data of SMC. Free swelling index and other variables were used as estimators to predict the parameters of Groenevelt & Grant's model by multiple regression method. All samples were divided into several groups based on textural classes and SMC was estimated for them in four steps. Grouping the data improved the estimation of SMC. In soil textural groups of the numbers 3 (silty clay loam and clay loam classes), 7 (sandy loam class) and 8 (sand, loamy sand and sandy loam) the IRMSE and AIC values were decreased from 0.07 and 77.85 to 0.06 and 72.28, from 0.05 and 1.63 to 0.04 and -61.78 and from 0.06 and 86.11 to 0.05 and 2.97, respectively. Therefore, using the free swelling index as an estimator, significantly improved the estimates of SMC through the Groenevelt and Grant's model.

**Keywords:** Cation exchange capacity, Groenevelt and Grant's model, Pedotransfer functions

همکاران (1988). محققان از متغیرهای متعددی برای تخمین SMC استفاده کرده‌اند. گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)<sup>2</sup> یکی از این متغیرها است (پاچپسکی و راولز (1999).

گنجایش تبادل کاتیونی نه تنها به مقدار رس بلکه به نوع رس خاک نیز بستگی دارد. از آنجاکه حرکت و جابجایی یون‌ها در خاک بستگی به گنجایش تبادل کاتیونی آن دارد لذا این پارامتر در جذب و نگهداری

مقدمه

منحنی رطوبتی خاک<sup>1</sup> (SMC) از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌شمار می‌رود (واکزاک و همکاران 2006) که بیانگر رابطه بین مقدار رطوبت و پتانسیل یا مکش ماتریک خاک هست (سیلرز و همکاران 2001). به دلیل نیازهای متعدد به تخمین SMC برای کاربردهای مختلف تلاش‌های زیادی برای به‌دست آوردن آن از داده‌های زودیافت انجام شده است (شاه و

<sup>2</sup> Cation exchange capacity

<sup>1</sup> Soil moisture curve

اساس مطالعات لی (1963)، گرابوسکا-الزوسکا (1970) و آرنپالی و همکاران (2008) سطح ویژه دارای رابطه بسیار نزدیک با شاخص انبساط آزاد هست که اندازه‌گیری آن بسیار ساده، سریع و کم‌هزینه است. بنابراین می‌توان از این متغیر به‌عنوان جایگزینی برای سطح ویژه در تخمین SMC استفاده نمود، که تاکنون در هیچ تحقیقی گزارش نشده است.

سیبولد و همکاران (2005) برای افزایش دقت تخمین گنجایش تبادل کاتیونی، خاک‌های مورد مطالعه را به گروه‌های همگون‌تر بر مبنای نوع کانی غالب، رده خاک‌ها، واکنش خاک و کربن آلی تفکیک نمودند. در واقع گروه‌بندی با همگون کردن بیشتر خصوصیات خاک‌ها باعث کاهش تغییرات در ویژگی‌های آن‌ها شده و توابع انتقالی حاصل از این گروه‌ها به مقدار چشمگیری صحیح‌تر خواهد بود (دریک و موتو 1982).

علی‌رغم تحقیقات زیاد این مسئله که چه متغیرهایی به‌عنوان ورودی جهت ایجاد توابع انتقالی<sup>4</sup> (PTFs) ضروری بوده و نسبت به دیگر متغیرها ترجیح داده می‌شوند (وستن و همکاران 2001) و یا اینکه موجب بهبود تخمین‌ها می‌شوند همچنان به‌عنوان یک سؤال باقی‌مانده است. بنابراین یافتن پارامترهایی که سهل‌الوصول بوده و استفاده از آن‌ها به‌عنوان تخمین‌گر موجب بهبود تخمین SMC گردد، حائز اهمیت بسیار است. وقتی اهمیت بهبود تخمین SMC معلوم می‌گردد که بدانیم جهت اجرای طرح‌های آبیاری بارانی و کاهش مصرف آب کشاورزی و افزایش بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی باید برای هر منطقه از خاک‌های کشور توابع دقیق تخمین SMC را داشته باشیم. بنابراین اهداف این مطالعه عبارت‌اند از (1) بررسی تأثیر شاخص انبساط آزاد و گنجایش تبادل کاتیونی بر بهبود تخمین منحنی رطوبتی خاک از طریق مدل گرنوالد و گرنوت (2004) با استفاده از رگرسیون چند متغیره و (2)

عناصر غذایی خاک بسیار مؤثر است. علاوه بر این فرآیندهای تورم و آبگیری و یا پراکندگی و همآوری ذرات خاک، که تأثیر قابل‌توجهی بر نگهداشت آب خاک دارند، بستگی به گنجایش تبادل کاتیونی آن دارند (سیبولد و همکاران 2005). گنجایش تبادل کاتیونی یکی از خصوصیات مهم خاک است که در پایگاه‌های اطلاعاتی- داده‌ای مربوط به خاک مورد نیاز بوده (مانریکو و همکاران 1991) و به‌عنوان ورودی در مدل‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد (کلر و همکاران 2001).

مشکلات ناشی از خاک‌های با قابلیت تورم در تمام دنیا گزارش شده است (رائو و همکاران 2004). علت مشکلات ناشی از خاک‌های با قابلیت تورم به‌دلیل پتانسیل ذاتی واکنش آن‌ها به تغییرات در رژیم‌های رطوبتی مختلف است. این خاک‌ها با تغییر مقدار رطوبت تغییر حجم پیدا می‌کنند. به‌گونه‌ای که با جذب آب در فصول بارانی افزایش حجم پیدا می‌کنند و با بخار شدن آب آن‌ها و از دست دادن آب در فصول گرم سال حجم آن‌ها کاهش می‌یابد (هولتز و گیسیس 1956، چن 1975). انبساط و انقباض خاک‌های رسی علاوه بر مقدار رس به ماهیت خود آن‌ها نیز بستگی دارد (گرین-کلی 1974). این خاک‌ها قادر به جذب و نگهداری مقدار بالای آب می‌باشند (وارکتین 1962) که به‌شدت SMC را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شاخص انبساط آزاد<sup>3</sup> (FSI) خاک از ویژگی‌های شاخص خاک‌های با قابلیت تورم هست (رائو و همکاران 2004).

با توجه به اینکه سطوح داخلی و خارجی رس‌ها، به‌شدت، نگهداری رطوبت در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (دلینار و ترانر 2004 و 2005) و سطح ویژه توسط محققان متعددی (واکزاک 1984) برای تخمین SMC مورد استفاده قرار گرفته است، ولی اندازه‌گیری آن مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه است. از طرف دیگر بر

<sup>4</sup> Pedotransfer functions

<sup>3</sup> Free swelling index

غیرقطبی است که برعکس آب باعث انبساط خاک نمی‌شود. در صورتی که آب باعث انبساط کامل خاک می‌گردد. پس از 24 ساعت نمونه‌ها به تعادل رسیده و حجم نهایی خاک در هر کدام از استوانه‌ها قرائت شد. شاخص انبساط آزاد خاک با استفاده از فرمول زیر به دست آمد (سیواپولائیا و همکاران 1987):

$$FSI(\%) = \frac{V_d - V_k}{V_k} \cdot 100 \quad [1]$$

$V_d$  حجم خاک داخل استوانه حاوی آب مقطر و  $V_k$  حجم خاک داخل استوانه حاوی کروزن بود.

مدل گرنوالت و گرن<sup>6</sup> (2004)

از آنجاکه مدل گرنوالت و گرن در خاک‌های با کلاس‌های بافتی مختلف، شنی تا رسی قابلیت تخمین رطوبت را داشته و تخمین رطوبت را در تمام دامنه رطوبتی از صفر تا 1500 کیلوپاسکال و به‌ویژه در هر دو انتهای خشک و تر منحنی رطوبتی خاک انجام می‌دهد (گرنوالت و گرن 2004)، برخلاف مدل ون‌گنوختن مشکل منفی یا غیرواقعی شدن رطوبت باقی‌مانده (هنگام برازش مدل) را ندارد (وریکن و همکاران 1989، گرنوالت و گرن 2001) و پارامترهای برازشی آن نقطه عطف مناسبی را نشان می‌دهند به همین علت در این تحقیق به‌عنوان مبنایی برای تخمین SMC مورد استفاده قرار گرفت.

$$\theta(h) = \theta_{wp} + K_1 \int_0^h \exp\left(\frac{\alpha - K_0}{15000^n} \frac{z}{\theta}\right) \exp\left(\frac{\alpha K_0}{h^n} \frac{z}{\theta}\right) dz \quad [2]$$

که  $K_0$ ،  $K_1$  و  $n$  پارامترهای برازشی مدل گرنوالت و گرن،  $\theta_{wp}$  مقدار رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دائم و  $h$  مکش بر حسب cm است. مدل گرنوالت و گرن با استفاده از برنامه Solver در نرم‌افزار Excel بر داده‌های اندازه‌گیری شده SMC برازش شد و پارامترهای مدل به دست آمد.

بررسی تأثیر گروه‌بندی داده‌ها بر اساس کلاس‌های بافتی بر بهبود تخمین منحنی رطوبتی خاک.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

برای انجام این تحقیق تعداد 147 نمونه خاک دست‌خورده و دست‌نخورده از لایه سطحی (119 نمونه) و زیرسطحی (28 نمونه) در استان‌های آذربایجان غربی (30 نمونه)، آذربایجان شرقی (30 نمونه)، مازندران (30 نمونه)، همدان (27 نمونه) و کرمانشاه (30 نمونه) جمع‌آوری شد. نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری به ارتفاع 4/5 سانتی‌متر و قطر 5/3 سانتی‌متر تهیه گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش هیدرومتر (گی و ار 2002)، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری (گروسمن و رینش 2002) و گنجایش تبادل کاتیونی با روش استات سدیم با  $pH=8/2$  (چپمن 1965) اندازه‌گیری شدند. برای به دست آوردن SMC مقدار رطوبت در مکش‌های 0، 1، 2، 4 و 6 کیلوپاسکال با دستگاه جعبه شن و در مکش‌های 10، 30، 100، 200، 400، 800 و 1500 کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات تحت فشار برای 147 نمونه خاک تعیین گردید. اندازه‌گیری‌های فوق تا مکش 100 کیلوپاسکال بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و بالاتر از آن بر روی نمونه‌های دست‌خورده انجام شد.

برای اندازه‌گیری شاخص انبساط آزاد 20 گرم خاک آون خشک از الک 40 مش عبور داده شد. هر 10 گرم آن در یک استوانه مدرج 100 میلی‌لیتری مجزا ریخته شد. یکی از آن‌ها با آب مقطر و دیگری با محلول کروزن<sup>5</sup> به حجم رسانده و با استفاده از یک میله شیشه‌ای محتویات داخل استوانه‌ها به هم زده شدند. علت استفاده از کروزن این بود که کروزن مایعی

<sup>6</sup> Groenevelt and Grant

<sup>5</sup> Kerosene

پارامترهای مدل گرنوالت و گرنت به‌عنوان متغیرهای وابسته یا خروجی مورد استفاده قرار گرفتند. ایجاد توابع در چهار مرحله صورت گرفت. متغیرهای ورودی در هر مرحله در جدول 3 نشان داده شده‌اند.

ابتدا کل داده‌ها برای ایجاد توابع در چهار مرحله فوق استفاده شدند. سپس برای بررسی تأثیر گروه‌بندی بر دقت توابع ایجاد شده و یا احتمالاً بهبود دقت توابع ایجاد شده، نمونه‌ها در هشت گروه و یا کلاس بافتی بر اساس تعداد نمونه‌های موجود کلاس‌بندی شدند (جدول 2) و برای هر کلاس در چهار مرحله ایجاد توابع تکرار شد.

#### معیارهای ارزیابی دقت<sup>9</sup> و قابلیت اعتماد<sup>10</sup> مدل‌ها

در این تحقیق منظور از دقت و قابلیت اعتماد، مقدار نزدیکی رطوبت اندازه‌گیری و تخمینی به‌ترتیب برای داده‌های آموزش و آزمون است. برای بررسی دقت و قابلیت اعتماد توابع انتقالی از آماره‌های معیار اطلاعات آکایک<sup>11</sup> (AIC) (آکایک 1974)، ضریب تبیین<sup>12</sup> ( $R^2$ )، انتگرال ریشه دوم میانگین مربعات خطا<sup>13</sup> (IRMSE)، انتگرال میانگین خطا<sup>14</sup> (IME) و ضریب بهبود نسبی<sup>15</sup> (RI) استفاده شد.

معیار اطلاعات آکایک از رابطه زیر تعیین شد (آکایک 1974):

$$AIC = N \ln \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_m - \theta_p)^2}{N} + 2n_p \quad [3]$$

$n_p$  تعداد پارامترهای مدل که باید تخمین‌زده شوند،  $N$  تعداد نمونه‌های خاک،  $\theta_m$  و  $\theta_p$  به‌ترتیب مقدار رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده می‌باشند.

#### مراحل ایجاد توابع

ابتدا آزمون نرمال بودن متغیرها (کولموگروف-اسمیرنوف<sup>7</sup>) با استفاده از نرم‌افزار MINITAB انجام شد. متغیرهایی که توزیع نرمال نداشتند، تبدیل شدند. از تبدیل‌های  $\log x$ ،  $\log x$  و  $x^{0.5}$  به‌ترتیب برای نرمال‌کردن رس، پارامتر  $n$  و Silt/Sand استفاده شد. سپس کل متغیرها تبدیل استاندارد شدند به‌گونه‌ای که میانگین صفر و واریانس یک داشته باشند.

جهت ایجاد توابع، دو سوم نمونه‌ها برای ایجاد و یک سوم باقی‌مانده به‌صورت تصادفی برای آزمون توابع استفاده گردید. جهت اطمینان از عدم تفاوت معنی‌دار بین داده‌های ایجاد و اعتبارسنجی مقایسه میانگین (t-test) بین آن‌ها انجام شد (توماسلا و همکاران 2003). نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق از 12 کلاس بافتی 10 کلاس بافتی را پوشش دادند که در جدول 1 تعداد نمونه در هر کلاس نشان داده شده است. چون تعداد نمونه در بسیاری از کلاس‌ها جهت ایجاد توابع انتقالی کافی نبود ترکیبی از چند کلاس به‌عنوان یک گروه در نظر گرفته شد. جهت رسیدن به بهترین ترکیب کلاس‌ها برای تشکیل گروه‌ها برخی کلاس‌های بافتی در دو گروه یا بیشتر استفاده شدند. ترکیب کلاس‌ها برای تشکیل گروه‌ها در جدول 2 نشان داده شده است. همچنین به‌علت تعداد کم داده در هر گروه فقط مرحله ایجاد مدل برای آن‌ها انجام شد. روش رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی با نرم‌افزار Datafit برای ایجاد توابع انتقالی مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای درصد سیلت به شن (Silt/Sand)، درصد رس (Clay)، جرم مخصوص ظاهری<sup>8</sup> (BD)، شاخص انبساط آزاد (FSI) و گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) به‌عنوان متغیرهای مستقل یا ورودی و

<sup>9</sup> Accuracy

<sup>10</sup> Reliability

<sup>11</sup> Akaike information criterion

<sup>12</sup> Coefficient of determination

<sup>13</sup> Integral root mean square error

<sup>14</sup> Integral mean error

<sup>15</sup> Relative improvement

<sup>7</sup> Kolmogorov-Smirnov

<sup>8</sup> Bulk density

برای ارزیابی خطای کل توابع پارامتریک در هر مرحله پس از تخمین پارامترهای مدل گرانولت و گرنت از آن‌ها برای شبیه‌سازی کل منحنی رطوبتی خاک استفاده شد. سپس منحنی شبیه‌سازی شده در هر مرحله با منحنی اندازه‌گیری شده از طریق آماره‌های زیر به صورت منحنی به منحنی مقایسه گردید (نتیجه و تاپکن هینزیش 1993).

جدول 1- کلاس‌های بافتی و تعداد نمونه‌های آن‌ها برای 147 نمونه خاک.

تعداد نمونه	بافت
6	رسی
6	رس سیلتی
10	لوم رسی
11	لوم رسی سیلتی
2	لوم رسی شنی
56	لوم سیلتی
33	لوم
20	لوم شنی
2	شن لومی
1	شنی

جدول 2 - نحوه گروه‌بندی نمونه‌ها.

شماره گروه	بافت	تعداد نمونه
1	رسی (رسی، رس سیلتی، لوم رسی، لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی)	35
2	رسی، رس سیلتی، لوم رسی	22
3	لوم رسی سیلتی، لوم رسی	21
4	لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی	13
5	لوم سیلتی	56
6	لومی	33
7	لوم شنی	20
8	شنی (شنی، شن لومی، لوم شنی)	23

جدول 3 - متغیرهای ورودی توابع ایجاد شده در چهار مرحله.

مرحله	متغیرهای ورودی برای هر مرحله	تابع انتقالی ایجاد شده
مرحله 1	BD و Clay, Silt/Sand	PTF <sub>1</sub>
مرحله 2	FSI و BD, Clay, Silt/Sand	PTF <sub>2</sub>
مرحله 3	CEC و BD, Clay, Silt/Sand	PTF <sub>3</sub>
مرحله 4	FSI	PTF <sub>4</sub>

$$IME = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta_p - \theta_m) d \log |h| \quad [4]$$

[5]

در سطح 1 درصد با پارامتر  $\theta_{wp}$  مدل گرنوالت و گرنیت در کل داده‌ها داشت. از آنجاکه پارامتر  $\theta_{wp}$  مربوط به مقدار رطوبت در نقطه پژمردگی دائم هست و نگهداشت آب در این نقطه ناشی از جذب سطحی است، به همین علت غالباً از بافت خاک و به‌ویژه رس خاک و نواحی سطحی خاک تأثیر می‌پذیرد (جین و همکاران 2004) که این عوامل در واقع کنترل کننده FSI می‌باشند. همبستگی FSI با سایر متغیرها از جمله پارامترهای مدل‌های منحنی رطوبتی در غالب گروه‌های بافتی بهبود یافت. هرچند در برخی دیگر از گروه‌های بافتی این همبستگی کاهش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد که رابطه FSI با سایر متغیرها از جمله متغیرهای خروجی در گروه‌های بافتی مختلف متفاوت است.

ضریب همبستگی پیرسون فقط همبستگی‌های ساده خطی بین دو متغیر را نشان می‌دهد، در صورتی‌که در بسیاری از موارد همبستگی بین متغیرها پیچیده و غیر خطی است. به همین علت همبستگی‌های غیرخطی FSI با تمام ویژگی‌ها در گروه کل داده‌ها بررسی شد و جدول مربوطه (جدول 6) آورده شد. مشاهده می‌شود که همبستگی FSI با غالب ویژگی‌ها بهبود یافته و همبستگی آن با رس، CEC و  $\theta_{wp}$  معنی‌دار بود. بنابراین همان‌گونه که در جدول مربوط به مدل‌های ایجادشده نیز مشخص است FSI دارای همبستگی‌های غیرخطی با متغیرهای خروجی است. بنابراین استفاده از آن به‌عنوان تخمین‌گر در غالب گروه‌های بافتی مفید خواهد بود.

تخمین پارامترهای مدل گرنوالت و گرنیت با روش رگرسیون خطی و غیرخطی برای کل داده‌ها و گروه‌ها

در تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنیت برای کل داده‌ها، در مرحله 1 از ویژگی‌های پایه خاک (نسبت سیلت به شن، رس و جرم مخصوص ظاهری)

$$IRMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\hat{\theta}_p - \theta_m}{\hat{\theta}_p - \theta_m} \right)^2 \log \left| \frac{\hat{\theta}_p}{\theta_m} \right|$$

$h$  مکش ماتریک بر حسب kPa می‌باشد.  $\theta_m$  و  $\theta_p$  همان مفاهیم قبلی را دارند و  $a$  و  $b$  دامنه انتگرال بوده و به ترتیب نشان‌دهنده کمینه و بیشینه مکشی می‌باشند که مقدار رطوبت آن‌ها اندازه‌گیری شده است.

ضریب بهبود نسبی از رابطه زیر تعیین شد:

$$RI = \frac{IRMSE_1 - IRMSE_i}{IRMSE_1} \times 100 \quad i=2 \text{ و } 3 \text{ و } 4$$

[6]

$IRMSE_1$  انتگرال ریشه دوم میانگین مربعات خطای مرحله اول و  $IRMSE_i$  انتگرال ریشه دوم میانگین مربعات خطای مراحل 2 تا 4.

## نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری کلیه متغیرهایی که به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شدند و همچنین پارامترهای مدل گرنوالت و گرنیت برای کل داده‌ها (147 نمونه خاک) و همچنین برای گروه‌های مختلف به تفکیک در جدول 4 نشان داده شده است.

## همبستگی بین شاخص انبساط آزاد و سایر ویژگی‌های خاک

ضریب همبستگی پیرسون<sup>16</sup> بین شاخص آزاد و متغیرهای بکار رفته در PTFها برای کل 147 نمونه خاک و همچنین برای گروه‌های بافتی در جدول 5 نشان داده شده است.

شاخص انبساط آزاد همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح 5 درصد با رس خاک در کل داده‌ها داشت (جدول 5). احتمالاً علت آن سطح ویژه بالای رس‌ها هست. ریتو و همکاران (2009) گزارش کردند که سطح ویژه رابطه بسیار نزدیک با مقدار رس دارد  $(R^2=0/72)$ . همچنین FSI همبستگی مثبت و معنی‌داری

<sup>16</sup> Pearson coefficient of correlation

(2004) نشد. احتمالاً علت بهبود دقت تخمین SMC در مرحله 2 و مرحله 3 همبستگی مثبت و معنی‌دار پارامتر  $\theta_{wp}$  با FSI و گنجایش تبادل کاتیونی هست (جدول 5) که هر دو در مکش‌های بالا نقش مهمی در افزایش قدرت نگهداشت آب خاک دارند (آلتر 1982، پاپسکی و راولز 1999). FSI و CEC هر دو باعث بهبود دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنیت (2004) شدند، ولی با توجه به روش اندازه‌گیری ساده و ارزان FSI، مرحله 2 به‌عنوان بهترین PTF در تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنیت (2004) برای کل داده‌ها هست.

به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شد. استفاده از FSI به‌عنوان تخمین‌گر علاوه بر ویژگی‌های پایه خاک در مرحله 2، باعث بهبود دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنیت (2004) (SMC) در مرحله ایجاد شد، هرچند این بهبود معنی‌دار نبود ولی نزدیک به حد معنی‌داری (یعنی 1608) بود (جدول 7).

در مرحله 3، اضافه کردن گنجایش تبادل کاتیونی به ویژگی‌های پایه خاک باعث بهبود معنی‌دار دقت تخمین SMC در مرحله ایجاد شد. در مرحله 4، استفاده از FSI به‌تنهایی به‌عنوان تخمین‌گر باعث بهبود دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنیت

جدول 4 - ویژگی‌های آماری کلیه متغیرها برای کل داده‌ها و گروه‌های مختلف.

n	K <sub>0</sub>	K <sub>1</sub>	$\theta_{wp}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	FSI (%)	CEC (meq100 gr <sup>-1</sup> )	BD (gcm <sup>-3</sup> )	Clay (%)	Silt/Sand (-)	بافت
2/91	23/42	0/35	0/18	23/03	26/94	1/43	23/21	1/95	میانگین
0/90	49/71	0/09	0/06	16/78	12/95	0/17	13/81	1/72	انحراف استاندارد
6/13	283/05	0/60	0/34	77/78	63/40	1/95	65/6	13/47	بیشینه
0/86	1/78	0/11	0/00	0/00	0/65	1/02	3/47	0/03	کمینه
3/00	21/84	0/32	0/22	26/65	34/51	1/4	36/85	1/78	میانگین
1/88	44/09	0/11	0/05	15/07	9/27	0/15	10/23	1/31	انحراف استاندارد
10/32	239/76	0/60	0/34	60/0	55/29	1/68	63/91	5/48	بیشینه
0/14	1/78	0/11	0/13	0/00	20/32	1/02	12/83	0/15	کمینه
2/79	14/91	0/33	0/23	27/44	33/77	1/38	39/06	1/61	میانگین
1/53	25/79	0/11	0/06	16/37	8/79	0/15	10/09	1/43	انحراف استاندارد
7/72	111/89	0/53	0/34	60/00	49/31	1/61	63/91	5/48	بیشینه
0/86	1/78	0/16	0/13	7/14	20/32	1/02	12/83	0/15	کمینه
2/72	16/98	0/34	0/21	25/76	33/22	1/37	34/37	1/78	میانگین
1/58	26/04	0/12	0/05	14/34	10/00	0/15	8/83	0/95	انحراف استاندارد
7/72	111/89	0/60	0/29	50/00	55/29	1/59	49/30	3/65	بیشینه
0/14	1/86	0/19	0/13	0/00	20/32	1/02	12/83	0/43	کمینه
3/35	33/58	0/31	0/21	25/31	35/75	1/42	33/10	2/07	میانگین
2/39	64/08	0/13	0/05	13/09	10/27	0/15	9/70	1/07	انحراف استاندارد
10/32	239/76	0/60	0/29	50/00	55/29	1/68	45/30	3/65	بیشینه
0/14	1/86	0/11	0/15	0/00	22/85	1/11	13/95	0/43	کمینه
2/97	22/04	0/37	0/19	26/28	28/69	1/39	21/79	2/53	میانگین
1/46	40/82	0/08	0/03	18/21	10/92	0/13	13/17	1/25	انحراف استاندارد
10/55	241/04	0/57	0/27	77/78	50/16	1/65	65/6	7/07	بیشینه
0/06	2/39	0/15	0/13	0/00	0/65	1/02	3/47	0/65	کمینه
3/16	24/92	0/34	0/17	20/98	25/17	1/46	19/82	1/27	میانگین
1/60	57/61	0/07	0/05	17/42	14/15	0/14	10/51	0/57	انحراف استاندارد
10/32	283/05	0/50	0/30	66/67	63/40	1/95	44/90	3/20	بیشینه
1/52	1/86	0/11	0/00	0/00	0/65	1/23	7/39	0/70	کمینه
2/95	16/30	0/34	0/12	13/23	14/42	1/54	11/05	1/36	میانگین
0/76	38/75	0/09	0/05	9/03	10/53	0/25	5/81	2/26	انحراف استاندارد
5/49	180/16	0/45	0/27	33/33	48/03	1/88	27/00	8/22	بیشینه
1/67	2/16	0/20	0/07	0/00	3/64	1/13	4/11	0/22	کمینه
3/28	27/02	0/34	0/11	12/53	13/77	1/53	10/81	1/78	میانگین
1/61	66/15	0/08	0/05	8/84	10/17	0/23	5/61	3/32	انحراف استاندارد
9/81	281/25	0/45	0/27	33/33	48/03	1/88	27/00	13/47	بیشینه
1/67	2/16	0/20	0/03	0/00	3/64	1/13	4/11	0/03	کمینه



جدول 5- همبستگی خطی شاخص انبساط آزاد با سایر ویژگی‌های خاک در کل داده‌ها و در گروه‌ها و کلاس‌های بافتی.

	گروه‌ها								کل	
	8	7	6	5	4	3	2	1		
	-0/03	0/03	0/14	0/16	-0/23	0/02	0/02	-0/05	0/11	Silt/Sand
	0/10	0/08	0/15	-0/04	0/43	-0/12	-0/24	-0/01	0/21*	Clay
	0/00	0/01	0/11	0/10	-0/15	0/06	0/04	-0/02	-0/06	BD
	0/16	0/11	-0/12	0/14	0/58*	0/21	0/07	0/23	0/25**	CEC
	0/52*	0/46*	0/28	0/15	0/55*	0/21	0/09	0/22	0/33**	$\theta_{wp}$
	-0/06	-0/04	-0/32	0/15	-0/34	-0/14	-0/01	-0/12	0/10	$K_1$
	-0/31	-0/42	-0/05	-0/03	-0/16	-0/18	-0/11	-0/14	-0/05	$K_0$
	-0/18	-0/39	0/09	-0/02	-0/21	-0/20	-0/09	-0/14	-0/13	n

\* و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطوح 5 و 1 درصد را نشان می‌دهند.

جدول 6- همبستگی غیرخطی شاخص انبساط آزاد با پارامترهای منحنی رطوبتی خاک برای کل داده‌ها.

پارامتر	معادله	r	پارامتر	معادله	r
FSI-Si/S	$FSI = -0/38Si/S^2 + 3/88Si/S + 18/02$	+0/19	FSI- $\theta_{wp}$	$FSI = -261/560\theta_{wp}^2 + 196/610\theta_{wp} - 3/37$	+0/33**
FSI-Clay	$FSI = -0/02Clay^2 + 1/38Clay + 6/21$	+0/29**	FSI- $K_1$	$FSI = -13/84K_1^2 + 25/28K_1 + 13/50$	+0/10
FSI-BD	$FSI = -44/54BD^2 + 123/44BD - 61/20$	-0/13	FSI- $K_0$	$FSI = -0/16K_0^2 + 2/84K_0 + 13/11$	+0/15
FSI-CEC	$FSI = -0/01CEC^2 + 0/74CEC + 9/85$	+0/27**	FSI-n	$FSI = -37/63n^2 + 7/26n + 24/64$	-0/15

\*\* معنی‌داری در سطح 1 درصد را نشان می‌دهد.

نسبت ذرات ریز کاهش می‌یابد که ناشی از رفتار جذب سطحی ذرات رس هست (شاه و همکاران 1988، هوانگ و چوی 2006، محمدی و ون کلوستر 2011b).

کلاس‌های بافتی رسی، رس سیلتی و لوم رسی در جدول 7 و شکل 1 نتایج تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرننت در گروه شماره 2 که شامل کلاس‌های بافتی رسی، رس سیلتی و لوم رسی هست نشان داده شده است.

### گروه بافتی رسی

در مراحل 2 و 4، استفاده از FSI به ترتیب به همراه ویژگی‌های پایه و به تنهایی بهبودی در دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرننت در گروه بافتی رسی ایجاد نکرد. ولی در مرحله 3، اضافه کردن CEC باعث بهبود معنی‌دار دقت تخمین مدل شد (جدول 7 و شکل 1). در واقع استفاده از FSI در گروه بافتی رسی برای تخمین SMC موفقیت‌آمیز نبود. محققان بسیاری گزارش کردند که دقت تخمین SMC با افزایش

جدول 7- نتایج تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت برای کل داده‌ها و گروه‌ها.

IME ( $m^3m^{-3}$ )	IRMSE ( $m^3m^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	AIC	RI	مرحله	گروه
					ایجاد	کل داده‌ها
0/02	0/06	0/98	1693/27		مرحله 1	
0/01	0/06	0/98	1610/10	4/66	مرحله 2	
0/01	0/05	0/98	1480/91*	9/15	مرحله 3	
0/02	0/06	0/98	1792/73	-5/01	مرحله 4	
					آزمون	
0/00	0/05	0/98	428/42		مرحله 1	
0/00	0/05	0/98	416/96	-0/85	مرحله 2	
0/00	0/05	0/98	400/74*	-2/66	مرحله 3	
0/00	0/06	0/98	478/02	-6/27	مرحله 4	
0/01	0/06	0/98	302/81		مرحله 1	1 (رسی)
0/01	0/06	0/98	309/71	-1/36	مرحله 2	
0/01	0/06	0/99	203/36*	6/04	مرحله 3	
0/01	0/07	0/98	308/30	-9/17	مرحله 4	
-0/01	0/06	0/99	36/30		مرحله 1	2 (رسی،
-0/01	0/06	0/99	37/46	-1/45	مرحله 2	رس سیلتی
-0/01	0/05	0/99	-71/83*	15/16	مرحله 3	و لوم رسی)
-0/01	0/07	0/99	79/81	-9/01	مرحله 4	
0/00	0/07	0/98	77/85		مرحله 1	3 (لوم رسی
0/00	0/06	0/98	72/28*	3/12	مرحله 2	سیلتی و لوم
0/00	0/06	0/99	0/81*	7/93	مرحله 3	رسی)
0/00	0/07	0/98	62/94*	-2/59	مرحله 4	
0/02	0/05	0/98	-127/01		مرحله 1	4 (لوم رسی
0/02	0/04	0/98	-129/10	8/61	مرحله 2	شنی و لوم
0/02	0/05	0/98	-126/02	0/74	مرحله 3	رسی
0/02	0/06	0/98	-42/28	-29/36	مرحله 4	سیلتی)
0/02	0/05	0/99	506/75		مرحله 1	5 (لوم
0/02	0/05	0/99	489/41	3/22	مرحله 2	سیلتی)
0/02	0/05	0/99	441/87*	5/11	مرحله 3	
0/02	0/05	0/99	511/30	-4/90	مرحله 4	
0/02	0/05	0/98	77/34		مرحله 1	6 (لومی)
0/02	0/05	0/98	96/41	3/59	مرحله 2	
0/02	0/05	0/98	81/95	-1/36	مرحله 3	
0/02	0/05	0/99	-53/23*	12/01	مرحله 4	
0/02	0/05	0/98	1/63		مرحله 1	7 (لوم شنی)
0/02	0/05	0/99	-61/78*	10/73	مرحله 2	

IME ( $m^3m^{-3}$ )	IRMSE ( $m^3m^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	AIC	RI	مرحله	گروه
0/02	0/05	0/98	12/70	-1/88	مرحله 3	
-0/01	0/07	0/99	18/53	-32/65	مرحله 4	
0/02	0/06	0/98	86/11		مرحله 1	8 (شنی)
0/02	0/05	0/98	2/97*	11/75	مرحله 2	
0/01	0/05	0/98	50/56*	6/26	مرحله 3	
0/00	0/06	0/99	56/10*	-11/49	مرحله 4	

\* نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (در سطح 5 درصد) بین PTF<sub>1</sub> با سایر PTFها بر اساس آماره آکایک هست.

(هیال 1998)، به‌همین علت استفاده از آن‌ها باعث بهبود دقت تخمین‌ها در این گروه بافتی شد. لیا و همکاران (2011) SMC را با استفاده از مدل ون‌گونختن به روش پارامتریک با رگرسیون خطی در چند کلاس بافتی تخمین زدند و بیشترین مقدار R<sup>2</sup> در تخمین  $\theta_r$  بافت لوم رسی را گزارش کردند.  $\theta_r$  هم مانند  $\theta_{wp}$  مقدار رطوبت در نقطه پژمردگی دائم است. مقدار نگهداشت رطوبت در این مکش به بخش رس خاک وابسته هست. هرچه مقدار رس خاک بیشتر باشد مقدار نگهداشت رطوبت در این مکش نیز افزایش پیدا می‌کند.

#### کلاس‌های بافتی لوم رسی شنی و لوم رسی

##### سیلتی

در گروه شماره 4 که شامل کلاس‌های بافتی لوم رسی شنی و لوم رسی سیلتی هست استفاده از FSI و CEC به‌همراه ویژگی‌های پایه به‌ترتیب در مراحل 2 و 3 دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت را بهبود داد (جدول 7 و شکل 1). هر چند این بهبود معنی‌دار نبود. میشر و همکاران (2011) گزارش کرد که CEC، درصد سدیم تبادلی، درصد رس و سطح ویژه انبساط مونت موریلونیت‌ها را کنترل می‌کنند. در این گروه بافتی به‌طور میانگین 33/10% رس وجود دارد که به‌علت سطح ویژه و انبساط بالای رس‌ها دارای FSI و CEC بالایی هستند و اضافه کردن این پارامترها به جمع ورودی‌های مدل باعث بهبود دقت تخمین‌ها شد. ولی در مرحله 4 استفاده از FSI بدون ویژگی‌های پایه خاک باعث بهبود دقت تخمین مدل نشد.

استفاده از FSI در مرحله 2 و مرحله 4 بهبود معنی‌داری در دقت تخمین SMC ایجاد نکرد. ولی در مرحله 3 اضافه کردن CEC باعث بهبود معنی‌دار دقت تخمین SMC شد. در این گروه بافتی همبستگی FSI با هیچ‌کدام از 4 پارامتر مدل گرنوالت و گرنت (2004) معنی‌دار نبود که احتمالاً علت نتیجه حاصله باشد. با توجه به اینکه انبساط آزاد رس‌ها به سطح ویژه آن‌ها بستگی دارد (داسوگ و همکاران 1988) انتظار بر این بود که در این کلاس بافتی به‌دلیل بالا بودن سطح ویژه رس‌ها شاخص انبساط آزاد باعث بهبود دقت تخمین رطوبت به‌ویژه در مکش‌های بالا شود که نتیجه حاصله برخلاف انتظار بود. شاید علت این امر این باشد که در این کلاس بافتی خاک به‌دلیل ریز بودن آن اضافه کردن شاخص انبساط آزاد تأثیر چندانی در بهبود دقت تخمین‌ها نداشته است. پس در این گروه بافتی استفاده از FSI به‌عنوان تخمین‌گر قابل توصیه نیست.

#### بافت‌های لوم رسی سیلتی و لوم رسی

در گروه شماره 3 که شامل بافت‌های لوم رسی سیلتی و لوم رسی می‌باشد استفاده از FSI و CEC به‌همراه ویژگی‌های پایه به‌ترتیب در مراحل 2 و 3 موجب بهبود معنی‌دار دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت شد (جدول 7). از آنجاکه FSI (آرنپالی و همکاران 2008) و CEC (میرخانی و همکاران 1384) هر دو شاخصی از سطح ویژه رس‌ها (که وابسته به جزء ریز خاک است) می‌باشند و تأثیر بافت ریز خاک در نگهداشت رطوبت در مکش‌های بالا حائز اهمیت است

### بافت لوم سیلتی

در بافت لوم سیلتی استفاده از FSI و CEC به همراه ویژگی‌های پایه به ترتیب در مراحل 2 و 3 موجب بهبود دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت شد که این بهبود در مرحله 3 معنی‌دار بود (جدول 7 و شکل 1). در مرحله 4 استفاده از FSI بدون ویژگی‌های پایه بهبودی در دقت تخمین رطوبت ایجاد نکرد. اضافه کردن گنجایش تبادل کاتیونی به ویژگی‌های پایه خاک باعث بهبود معنی‌دار دقت تخمین مدل شد که احتمالاً به علت تأثیر بار سطوح ذرات خاک در نگهداشت رطوبت باشد. در خاک‌های با بافت ریز قدرت نگهداری آب توسط رس‌ها به علت بالا بودن سطح ویژه و ایجاد فضای منفذی و تعداد منافذ ریز بیشتر بالاست (خلیل و همکاران 1981، هاینس و نیدو 1998، زندپارسا 2006).

### بافت لومی

استفاده از FSI به همراه ویژگی‌های پایه و به‌تنهایی به ترتیب در مراحل 2 و 4 باعث بهبود دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت در بافت لومی شد که در مرحله 4 بهبود حاصله معنی‌دار بود (جدول 7 و شکل 1). نکته قابل توجه در این کلاس بافتی این است که استفاده از FSI به‌تنهایی بهترین نتیجه را ایجاد کرد. یعنی در این کلاس بافتی تنها با اندازه‌گیری ساده و ارزان قیمت FSI می‌توان SMC را با دقت بالایی از طریق مدل گرنوالت و گرنت تخمین زد. شاید علت این نتیجه همبستگی مثبت بین FSI با بخش رس در این کلاس بافتی باشد (هر چند معنی‌دار نبود، جدول 5). با توجه به جدول ویژگی‌های آماری این کلاس بافتی مقدار متوسط BD برابر با 1/46 گرم بر سانتی‌متر مکعب هست که مقدار بالایی است. محققان مختلفی گزارش کردند که در خاک‌های فشرده، منحنی رطوبتی لزوماً با توزیع اندازه ذرات توضیح داده نمی‌شود (هوانگ و همکاران 2010، فردلاند و همکاران 2002، شوپ و همکاران 2004، محمدی و مسکینی 2013).

احتمالاً به همین علت استفاده از FSI به‌تنهایی به‌عنوان تخمین‌گر نتیجه بهتری نسبت به استفاده از آن به همراه ویژگی‌های پایه داشته است.

### بافت لوم شنی

در بافت لوم شنی استفاده از FSI همراه با ویژگی‌های پایه در مرحله 2 موجب بهبود معنی‌دار دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت شد (جدول 7 و شکل 1). در صورتی که در مرحله 3 و مرحله 4 بهبودی در دقت توابع ایجاد شده حاصل نشد. احتمالاً به علت بافت درشت این خاک باشد که با وجود انبساط آزاد کمتر، افزودن FSI به‌عنوان ورودی به جمع ورودی‌ها در این کلاس بافتی باعث بهبود معنی‌دار دقت تخمین‌ها در مقایسه با بافت ریزتر شد. راولز و همکاران (2003) برای ارزیابی تأثیر بافت خاک و کربن آلی بر SMC از روش مدیریت گروهی داده‌ها استفاده کردند و نشان دادند که در مکش 33 کیلوپاسکال نگهداشت آب با افزایش مقدار کربن آلی به‌ویژه در بافت درشت افزایش می‌یابد. نتایج آن‌ها برای رطوبت در مکش 1500 کیلوپاسکال نشان داد که خاک‌های با مقدار رس کم بیشترین افزایش را با افزایش مقدار کربن آلی داشتند. در واقع نتایج آن‌ها هم نوعی برهمکنش بین بافت و سایر خصوصیات خاک بر نگهداری آب خاک را نشان می‌دهد که تأییدی بر برهمکنش تأثیر بافت و شاخص انبساط در تخمین رطوبت در این تحقیق است.

### گروه بافتی شنی

در گروه بافتی شنی (گروه 8) که شامل کلاس‌های شنی، شن لومی و لوم شنی هست استفاده از FSI و CEC به همراه ویژگی‌های پایه به ترتیب در مراحل 2 و 3 موجب بهبود معنی‌دار دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت شد (جدول 7 و شکل 1). در این گروه بافتی بهترین نتیجه در مدل دوم حاصل شد که در آن از FSI به همراه ویژگی‌های پایه برای تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنت استفاده شد. این

به عبارت دیگر گروه‌بندی مناسب قدرت پیش‌بینی خواص خاک‌ها را افزایش می‌دهد (سیرز و همکاران 1970). این نتایج مشابه نتایج فرانزمیر (1991)، وستن و همکاران (1985)، پاچپسکی و همکاران (1999)، لهارد (1995)، کلپ و هورنبرگر (1978) و ویلیامز و همکاران (1983) می‌باشد. پاچپسکی و راولز (1999) گزارش کردند که گروه‌بندی داده‌ها بر اساس کلاس‌های بافتی مختلف کمینه RMSE را در مقایسه با گروه‌بندی داده‌ها بر اساس رژیم رطوبتی و حرارتی داشت. سیبولد و همکاران (2005) برای افزایش دقت تخمین CEC خاک‌های مورد مطالعه را به گروه‌های همگون‌تر بر مبنای نوع کانی غالب، رده خاک‌ها، واکنش خاک و کربن آلی تفکیک نمودند و افزایش دقت تخمین را با انجام گروه‌بندی گزارش کردند. نمس و همکاران (2003) نتیجه‌گیری کردند که توابع انتقالی حاصل از مجموعه داده‌های کوچک و خاص یک خاک یا یک ناحیه، اگر در دسترس باشد، بهتر از داده‌های زیاد و عمومی است. یکی از دلایل بهبود تخمین‌ها در اثر گروه‌بندی ایجاد داده‌های همگون‌تر هست. چرا که با همگون‌تر شدن داده‌های مورد استفاده نتایج توابع انتقالی ایجاد شده بهتر می‌گردد (اسدو و آکامیگو 1990). هپر و همکاران (2006) نیز مشاهده کردند هنگامی که همه نمونه‌های خاک با هم مورد مطالعه قرار گرفتند، CEC با هیچکدام از متغیرها همبستگی نشان نداد. اما وقتی خاک‌ها بر اساس ویژگی‌های کانی‌شناسی گروه‌بندی شدند؛ بین CEC و دیگر متغیرها همبستگی مشاهده گردید. در واقع گروه‌بندی با همگون کردن بیشتر خصوصیات خاک‌ها باعث کاهش تغییرات در ویژگی‌های آن‌ها شده و توابع انتقالی حاصل از این گروه‌ها به مقدار چشمگیری صحیح‌تر بود (دریک و موتو 1982).

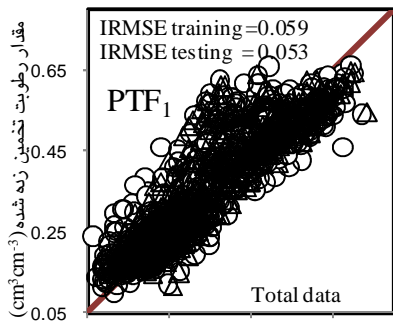
نتیجه برتری FSI نسبت به CEC در تخمین رطوبت در این گروه بافتی را نشان می‌دهد. در جدول همبستگی مربوط به این گروه بافتی (جدول 5) همبستگی FSI خاک با پارامتر  $\theta_{wp}$  مثبت و در سطح 5 درصد معنی‌دار بود. پس این نتیجه قابل انتظار بود. شاخص انبساط آزاد با سطح ویژه دارای همبستگی است و سطح ویژه در بخش رس خاک به ویژه رس‌های 2:1 بیشتر است (یوکسلن و کایا 2010). احتمالاً علت اینکه در گروه بافتی شنی اضافه کردن FSI باعث بهبود دقت تخمین PTFها شد این باشد که در این گروه بافتی به‌طور میانگین 10/81% رس وجود دارد. شاید مقدار کم رس باعث شده که استفاده از آن به‌عنوان تخمین‌گر نتواند اثر رس‌ها در نگهداشت رطوبت را وارد مدل کند. در مقابل FSI توانسته است اثر رس در نگهداشت رطوبت را به‌خوبی نشان دهد. از طرف دیگر شاید رس این خاک‌ها از نوع رس‌های مونت موریلونیتی باشد که دارای انبساط بالایی می‌باشند. میزان انبساط مونت موریلونیت‌ها وابسته به کانی‌شناسی رس، مقدار جذب آب، کاتیون‌های محلول آب و ترکیب اندازه ذرات متفاوت هست (میشرا و همکاران 2011).

نتایج تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرننت (2004) با استفاده از روش رگرسیون خطی و غیرخطی برای یک نمونه خاک از کل داده‌ها و هر گروه بافتی در شکل 2 آورده شده است.

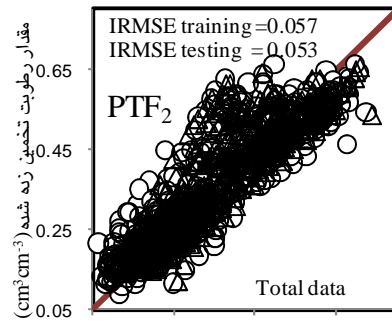
مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی و ضرایب آن‌ها برای کل داده‌ها و گروه‌ها در جدول 8 نشان داده شده است.

**تأثیر گروه‌بندی بر دقت تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرننت (2004)**

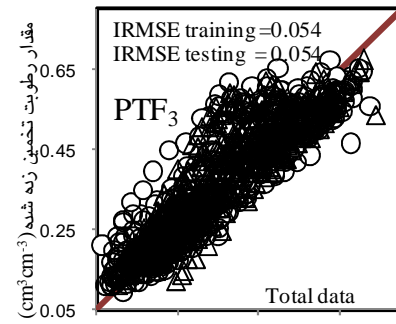
با گروه‌بندی داده‌ها بهبود قابل‌توجهی در قابلیت تخمین غالب PTFها صورت گرفت (جدول 7 و شکل 1).



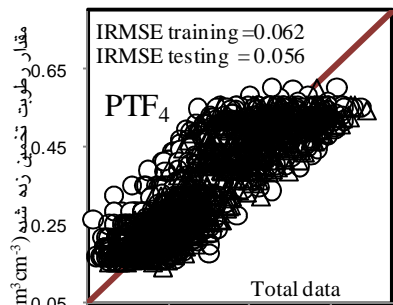
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



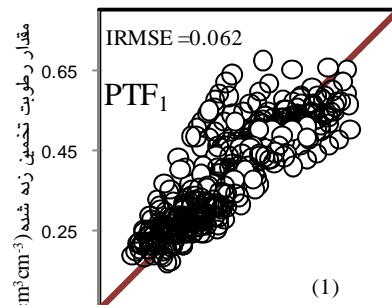
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



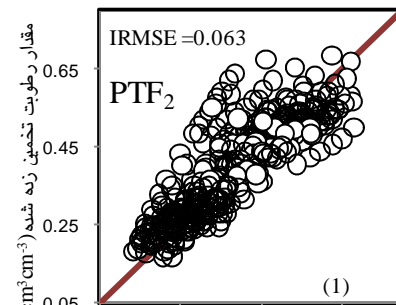
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



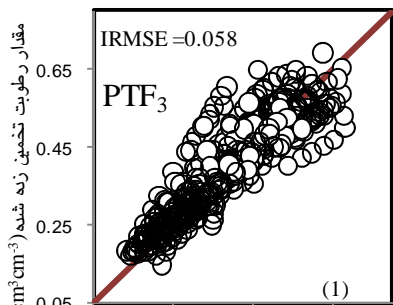
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



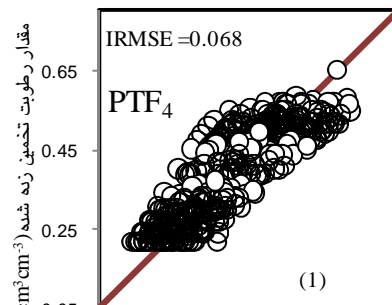
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



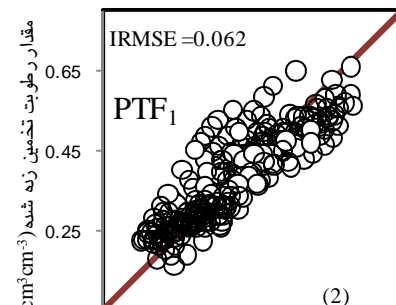
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



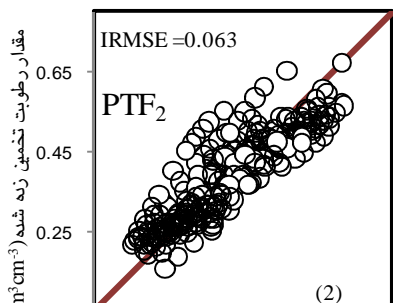
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



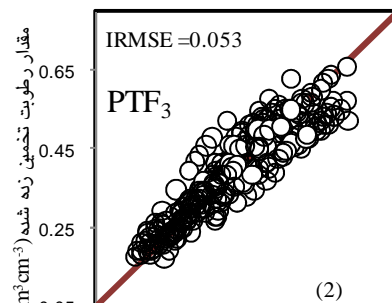
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



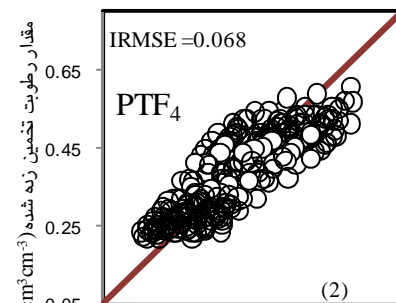
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



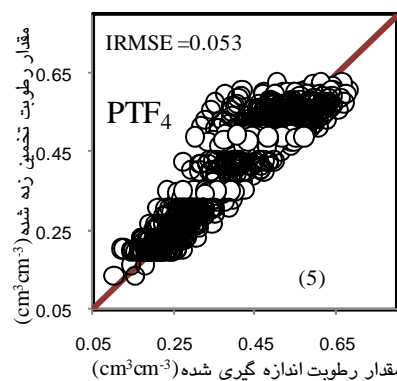
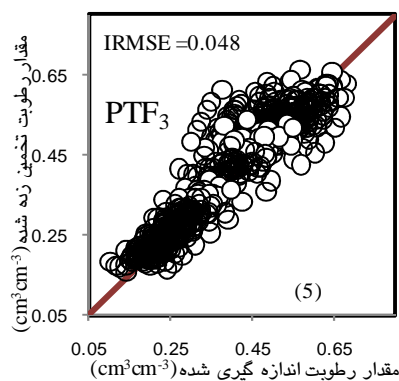
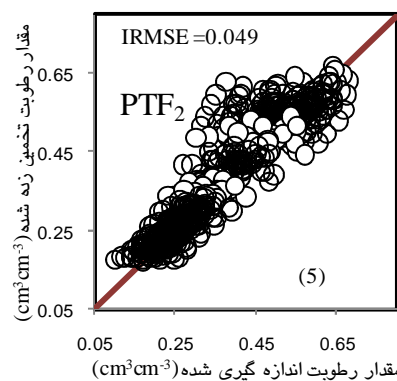
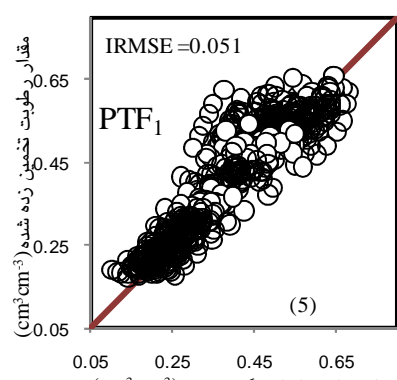
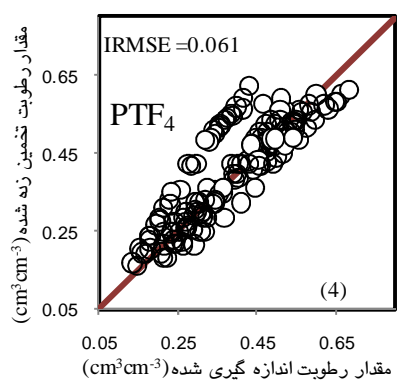
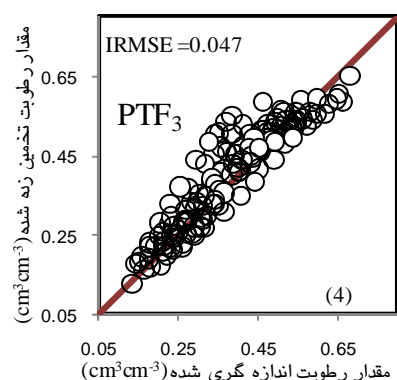
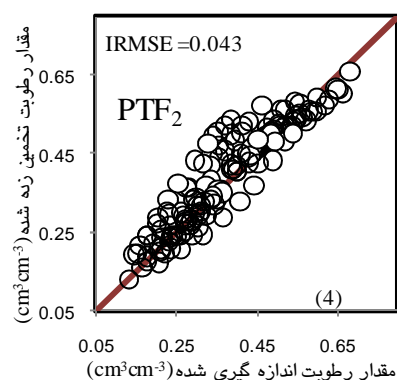
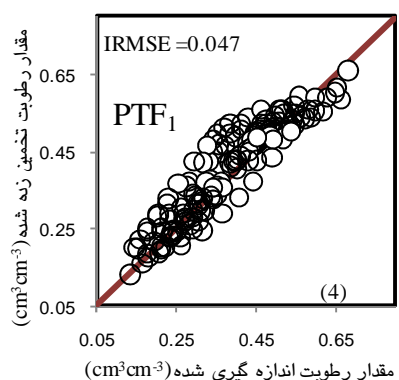
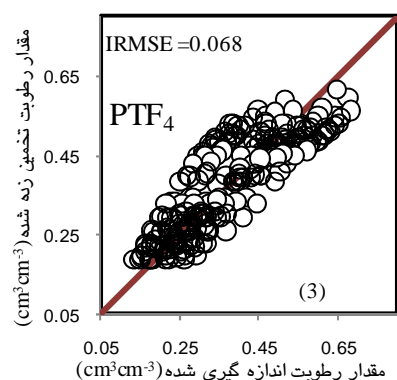
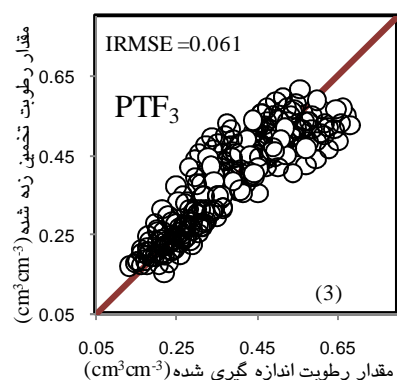
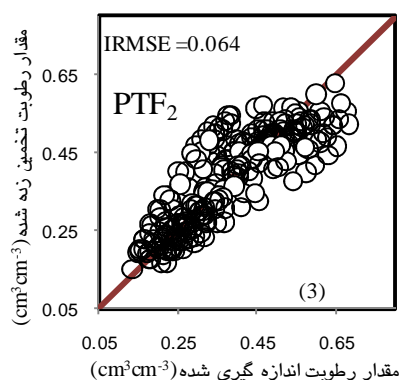
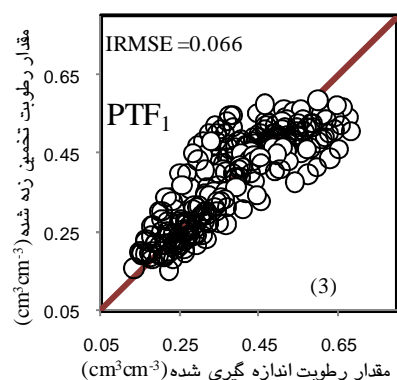
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)

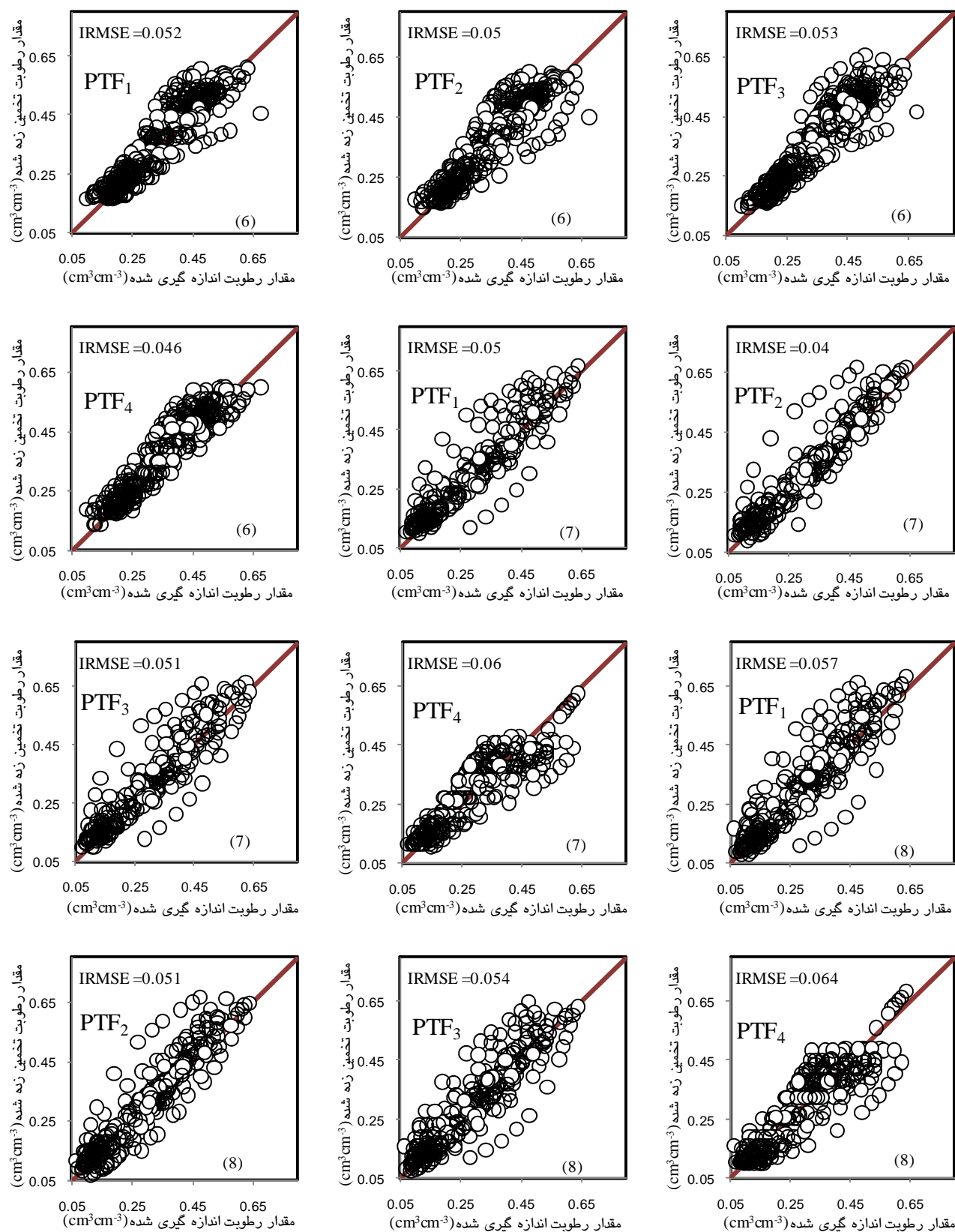


مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)



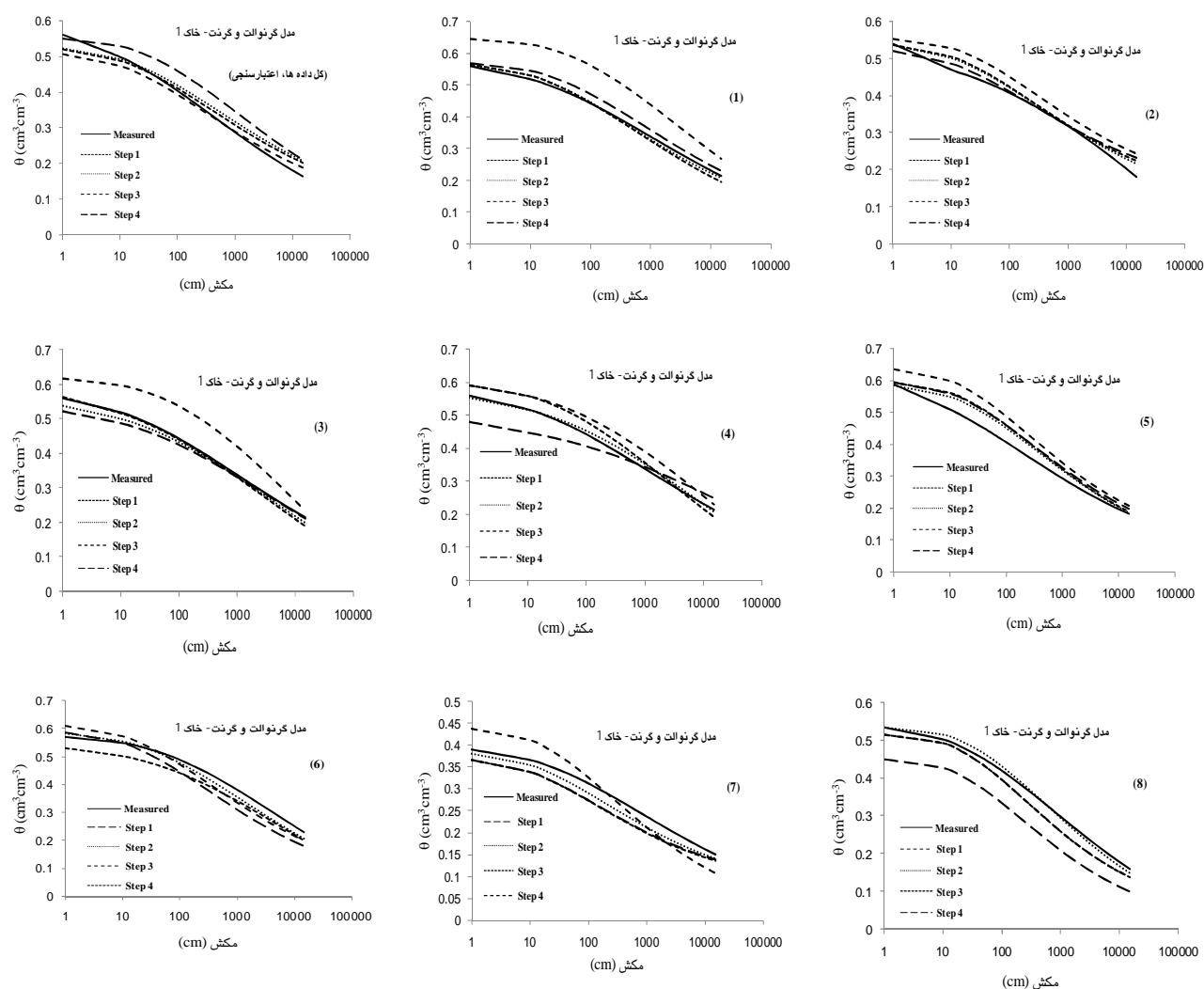
مقدار رطوبت اندازه گیری شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) / مقدار رطوبت تخمین زده شده (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)





شکل 1- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مقابل تخمینی حول خط 1:1 برای توابع ایجادشده در این تحقیق (در هر شکل اعداد داخل پرانتز شماره گروه را نشان می‌دهد).





شکل 2- نتایج تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرت (2004) برای یک نمونه خاک از کل داده‌ها و از هر گروه بافتی (در هر شکل اعداد داخل پرانتز شماره گروه را نشان می‌دهد).

جدول 8- مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی برازش شده و ضرایب آن‌ها برای کل داده‌ها و گروه‌ها.

گروه	مدل	معادله	مدل	معادله <sup>a</sup>
کل داده‌ها	$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = -0.1 \times \text{Silt/Sand} + 0.57 \times \text{Clay}^2 - 0.17 \times \text{BD}^3 - 0.01$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = -0.09 \times \text{Silt/Sand} + 0.41 \times \text{Clay}^2 - 0.02 \times \text{BD}^3 + 0.46 \times \text{CEC}^4 - 0.008$
	$K_1-1$	$K_1 = 0.18 \times \text{Silt/Sand} - 0.1 \times \text{Clay}^2 - 0.2 \times \text{BD}^3 - 0.13$	$K_1-3$	$K_1 = 0.19 \times \text{Silt/Sand} - 0.18 \times \text{Clay}^2 - 0.17 \times \text{BD}^3 + 0.14 \times \text{CEC}^4 - 0.11$
	$K_0-1$	$K_0 = -0.08 \times \text{Silt/Sand} + 0.17 \times \text{Clay}^2 + 0.06 \times \text{BD}^3 + 0.008$	$K_0-3$	$K_0 = -0.08 \times \text{Silt/Sand} + 0.16 \times \text{Clay}^2 + 0.07 \times \text{BD}^3 + 0.02 \times \text{CEC}^4 + 0.008$
	$n-1$	$n = -0.03 \times \text{Silt/Sand} - 0.16 \times \text{Clay}^2 + 0.01 \times \text{BD}^3 - 0.04$	$n-3$	$n = -0.05 \times \text{Silt/Sand} - 0.07 \times \text{Clay}^2 - 0.04 \times \text{BD}^3 - 0.2 \times \text{CEC}^4 - 0.05$
	$\theta_{wp-2}$	$\theta_{wp} = -0.09 \times \text{Silt/Sand} + 0.53 \times \text{Clay}^2 - 0.16 \times \text{BD}^3 + 0.21 \times \text{FSI}^4 - 0.02$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = 0.01 + 0.61 \times \text{FSI} - 0.08 \times \text{FSI}^3$
	$K_1-2$	$K_1 = 0.18 \times \text{Silt/Sand} - 0.13 \times \text{Clay}^2 - 0.2 \times \text{BD}^3 + 0.12 \times \text{FSI}^4 - 0.13$	$K_1-4$	$K_1 = -0.12 + 0.18 \times \text{FSI} - 0.01 \times \text{FSI}^3$
	$K_0-2$	$K_0 = -0.08 \times \text{Silt/Sand} + 0.18 \times \text{Clay}^2 + 0.06 \times \text{BD}^3 - 0.05 \times \text{FSI}^4 + 0.01$	$K_0-4$	$K_0 = -0.07 - 0.24 \times \text{FSI} + 0.06 \times \text{FSI}^3$
	$n-2$	$n = -0.04 \times \text{Silt/Sand} - 0.13 \times \text{Clay}^2 + 0.005 \times \text{BD}^3 - 0.17 \times \text{FSI}^4 - 0.03$	$n-4$	$n = -0.06 - 0.31 \times \text{FSI} + 0.03 \times \text{FSI}^3$
1	$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = -0.43 \times \text{Silt/Sand} + 0.38 \times \text{Clay}^2 + 0.03 \times \text{BD}^3$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = -0.27 \times \text{Silt/Sand} + 0.28 \times \text{Clay}^2 + 0.04 \times \text{BD}^3 + 0.54 \times \text{CEC}^4$
	$K_1-1$	$K_1 = -0.35 \times \text{Silt/Sand} + 0.11 \times \text{Clay}^2 + 0.35 \times \text{BD}^3$	$K_1-3$	$K_1 = -0.4 \times \text{Silt/Sand} + 0.14 \times \text{Clay}^2 + 0.34 \times \text{BD}^3 - 0.15 \times \text{CEC}^4$
	$K_0-1$	$K_0 = -0.14 \times \text{Silt/Sand} + 0.06 \times \text{Clay}^2 - 0.08 \times \text{BD}^3$	$K_0-3$	$K_0 = -0.06 \times \text{Silt/Sand} + 0.01 \times \text{Clay}^2 - 0.08 \times \text{BD}^3 + 0.3 \times \text{CEC}^4$
	$n-1$	$n = -0.14 \times \text{Silt/Sand} + 0.18 \times \text{Clay}^2 + 0.26 \times \text{BD}^3$	$n-3$	$n = -0.16 \times \text{Silt/Sand} + 0.19 \times \text{Clay}^2 + 0.25 \times \text{BD}^3 - 0.07 \times \text{CEC}^4$
	$\theta_{wp-2}$	$\theta_{wp} = -0.42 \times \text{Silt/Sand} + 0.38 \times \text{Clay}^2 + 0.03 \times \text{BD}^3 + 0.2 \times \text{FSI}^4$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = 0.06 \times \text{FSI}^3 + 0.12 \times \text{FSI}^2 + 0.02 \times \text{FSI} - 0.15$
	$K_1-2$	$K_1 = -0.34 \times \text{Silt/Sand} + 0.11 \times \text{Clay}^2 + 0.35 \times \text{BD}^3 + 0.13 \times \text{FSI}^4$	$K_1-4$	$K_1 = 0.21 \times \text{FSI}^3 - 0.05 \times \text{FSI}^2 - 0.32 \times \text{FSI} - 0.05$
	$K_0-2$	$K_0 = -0.14 \times \text{Silt/Sand} + 0.07 \times \text{Clay}^2 - 0.08 \times \text{BD}^3 + 0.1 \times \text{FSI}^4$	$K_0-4$	$K_0 = -0.03 \times \text{FSI}^3 - 0.18 \times \text{FSI}^2 + 0.26 \times \text{FSI} + 0.19$

گروه	مدل	معادله	مدل	معادله <sup>a</sup>	
2	n-2	$n = -0.13 \times \text{Silt/Sand} + 0.18 \times \text{Clay}^2 + 0.26 \times \text{BD}^3 + 0.14 \times \text{FSI}^4$	n-4	$n = 0.19 \times \text{FSI}^3 - 0.08 \times \text{FSI}^2 - 0.24 \times \text{FSI} - 0.01$	
	$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = -0.49 \times \text{Silt/Sand} + 0.28 \times \text{Clay}^2 + 0.01 \times \text{BD}^3$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = -0.2 \times \text{Silt/Sand} + 0.02 \times \text{Clay}^2 + 0.1 \times \text{BD}^3 + 0.8 \times \text{CEC}^4 + 0.17$	
	$K_1-1$	$K_1 = -0.28 \times \text{Silt/Sand} + 0.27 \times \text{BD}^3 + 0.19$	$K_1-3$	$K_1 = -0.3 \times \text{Silt/Sand} + 0.02 \times \text{Clay}^2 + 0.27 \times \text{BD}^3 - 0.05 \times \text{CEC}^4 + 0.18$	
	$K_0-1$	$K_0 = -0.16 \times \text{Silt/Sand} + 0.11 \times \text{Clay}^2 - 0.14 \times \text{BD}^3 - 0.07$	$K_0-3$	$K_0 = 0.07 \times \text{Silt/Sand} - 0.09 \times \text{Clay}^2 - 0.07 \times \text{BD}^3 + 0.62 \times \text{CEC}^4 + 0.07$	
	n-1	$n = -0.1 \times \text{Silt/Sand} + 0.25 \times \text{Clay}^2 + 0.16 \times \text{BD}^3 + 0.12$	n-3	$n = -0.05 \times \text{Silt/Sand} + 0.21 \times \text{Clay}^2 + 0.17 \times \text{BD}^3 + 0.12 \times \text{CEC}^4 + 0.14$	
	$\theta_{wp-2}$	$\theta_{wp} = -0.5 \times \text{Silt/Sand} + 0.33 \times \text{Clay}^2 + 0.18 \times \text{FSI}^4 - 0.02$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = 0.12 \times \text{FSI}^3 + 0.16 \times \text{FSI}^2 - 0.28 \times \text{FSI} - 0.14$	
	$K_1-2$	$K_1 = -0.29 \times \text{Silt/Sand} + 0.06 \times \text{Clay}^2 + 0.27 \times \text{BD}^3 + 0.19 \times \text{FSI}^4 + 0.16$	$K_1-4$	$K_1 = 0.25 \times \text{FSI}^3 - 0.19 \times \text{FSI}^2 - 0.27 \times \text{FSI} + 0.23$	
	$K_0-2$	$K_0 = -0.18 \times \text{Silt/Sand} + 0.17 \times \text{Clay}^2 - 0.15 \times \text{BD}^3 + 0.24 \times \text{FSI}^4 - 0.09$	$K_0-4$	$K_0 = -0.24 \times \text{FSI}^3 + 0.09 \times \text{FSI}^2 + 0.67 \times \text{FSI} + 0.05$	
	n-2	$n = -0.12 \times \text{Silt/Sand} + 0.36 \times \text{Clay}^2 + 0.15 \times \text{BD}^3 + 0.38 \times \text{FSI}^4 + 0.07$	n-4	$n = 0.03 \times \text{FSI}^3 + 0.02 \times \text{FSI}^2 + 0.21 \times \text{FSI} + 0.11$	
	3	$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = -0.05 \times \text{Silt/Sand} + 0.45 \times \text{Clay}^2 + 0.04 \times \text{BD}^3 - 0.17$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = -0.06 \times \text{Silt/Sand} + 0.25 \times \text{Clay}^2 + 0.02 \times \text{BD}^3 + 0.42 \times \text{CEC}^4 - 0.16$
$K_1-1$		$K_1 = -0.5 \times \text{Silt/Sand} - 0.13 \times \text{Clay}^2 + 0.08 \times \text{BD}^3 - 0.31$	$K_1-3$	$K_1 = -0.5 \times \text{Silt/Sand} - 0.04 \times \text{Clay}^2 + 0.09 \times \text{BD}^3 - 0.19 \times \text{CEC}^4 - 0.31$	
$K_0-1$		$K_0 = -0.11 \times \text{Silt/Sand} + 0.19 \times \text{Clay}^2 - 0.21 \times \text{BD}^3 - 0.14$	$K_0-3$	$K_0 = -0.11 \times \text{Silt/Sand} - 0.24 \times \text{BD}^3 + 0.39 \times \text{CEC}^4 - 0.14$	
n-1		$n = -0.4 \times \text{Silt/Sand} - 0.09 \times \text{Clay}^2 - 0.05 \times \text{BD}^3 - 0.4$	n-3	$n = -0.4 \times \text{Silt/Sand} - 0.1 \times \text{Clay}^2 - 0.05 \times \text{BD}^3 + 0.02 \times \text{CEC}^4 - 0.4$	
$\theta_{wp-2}$		$\theta_{wp} = -0.05 \times \text{Silt/Sand} + 0.48 \times \text{Clay}^2 + 0.03 \times \text{BD}^3 + 0.23 \times \text{FSI}^4 - 0.15$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = -0.13 \times \text{FSI}^3 + 0.07 \times \text{FSI}^2 + 0.42 \times \text{FSI} - 0.31$	
$K_1-2$		$K_1 = -0.5 \times \text{Silt/Sand} - 0.11 \times \text{Clay}^2 + 0.07 \times \text{BD}^3 + 0.11 \times \text{FSI}^4 - 0.3$	$K_1-4$	$K_1 = 0.02 \times \text{FSI}^3 - 0.09 \times \text{FSI}^2 + 0.11 \times \text{FSI} - 0.2$	
$K_0-2$		$K_0 = -0.1 \times \text{Silt/Sand} + 0.2 \times \text{Clay}^2 - 0.22 \times \text{BD}^3 + 0.11 \times \text{FSI}^4 - 0.13$	$K_0-4$	$K_0 = 0.18 \times \text{FSI}^3 - 0.09 \times \text{FSI}^2 - 0.26 \times \text{FSI} - 0.1$	
n-2		$n = -0.4 \times \text{Silt/Sand} - 0.08 \times \text{Clay}^2 - 0.05 \times \text{BD}^3 + 0.03 \times \text{FSI}^4 - 0.4$	n-4	$n = 0.2 \times \text{FSI}^3 - 0.07 \times \text{FSI}^2 - 0.36 \times \text{FSI} - 0.36$	
4		$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = -0.04 \times \text{Silt/Sand} + 0.77 \times \text{Clay}^2 + 0.23 \times \text{BD}^3 + 0.04$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = 0.04 \times \text{Silt/Sand} + 0.7 \times \text{Clay}^2 + 0.2 \times \text{BD}^3 + 0.36 \times \text{CEC}^4 - 0.04$
		$K_1-1$	$K_1 = -0.3 \times \text{Silt/Sand} + 0.18 \times \text{Clay}^2 + 0.56 \times \text{BD}^3 - 0.3$	$K_1-3$	$K_1 = -0.34 \times \text{Silt/Sand} + 0.22 \times \text{Clay}^2 + 0.58 \times \text{BD}^3 - 0.18 \times \text{CEC}^4 - 0.25$
	$K_0-1$	$K_0 = -0.11 \times \text{Silt/Sand} + 0.09 \times \text{Clay}^2 + 0.013 \times \text{BD}^3 + 0.06$	$K_0-3$	$K_0 = -0.12 \times \text{Silt/Sand} + 0.09 \times \text{Clay}^2 + 0.02 \times \text{BD}^3 - 0.04 \times \text{CEC}^4 + 0.08$	
	n-1	$n = -0.22 \times \text{Silt/Sand} - 0.11 \times \text{Clay}^2 + 0.38 \times \text{BD}^3 - 0.35$	n-3	$n = -0.26 \times \text{Silt/Sand} - 0.07 \times \text{Clay}^2 + 0.4 \times \text{BD}^3 - 0.22 \times \text{CEC}^4 - 0.29$	
	$\theta_{wp-2}$	$\theta_{wp} = -0.01 \times \text{Silt/Sand} + 0.69 \times \text{Clay}^2 + 0.24 \times \text{BD}^3 + 0.22 \times \text{FSI}^4 + 0.03$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = -0.46 \times \text{FSI}^3 - 0.12 \times \text{FSI}^2 + 1.48 \times \text{FSI} - 0.04$	
	$K_1-2$	$K_1 = -0.32 \times \text{Silt/Sand} + 0.24 \times \text{Clay}^2 + 0.56 \times \text{BD}^3 - 0.16 \times \text{FSI}^4 - 0.28$	$K_1-4$	$K_1 = 0.04 \times \text{FSI}^3 - 0.17 \times \text{FSI}^2 - 0.15 \times \text{FSI} - 0.22$	
	$K_0-2$	$K_0 = -0.14 \times \text{Silt/Sand} + 0.16 \times \text{Clay}^2 + 0.01 \times \text{BD}^3 - 0.2 \times \text{FSI}^4 + 0.08$	$K_0-4$	$K_0 = 0.298 \times \text{FSI}^3 - 0.22 \times \text{FSI}^2 - 0.73 \times \text{FSI} + 0.14$	
	n-2	$n = -0.26 \times \text{Silt/Sand} + 0.01 \times \text{Clay}^2 + 0.37 \times \text{BD}^3 - 0.35 \times \text{FSI}^4 - 0.32$	n-4	$n = 0.39 \times \text{FSI}^3 - 0.2 \times \text{FSI}^2 - 1.18 \times \text{FSI} - 0.21$	
	5	$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = 0.19 \times \text{Silt/Sand} + 0.4 \times \text{Clay}^2 - 0.06 \times \text{BD}^3$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = 0.14 \times \text{Silt/Sand} + 0.35 \times \text{Clay}^2 + 0.27 \times \text{CEC}^4 - 0.03$
		$K_1-1$	$K_1 = -0.2 \times \text{Silt/Sand} + 0.05 \times \text{Clay}^2 - 0.11 \times \text{BD}^3$	$K_1-3$	$K_1 = -0.24 \times \text{Silt/Sand} - 0.03 \times \text{Clay}^2 - 0.09 \times \text{BD}^3 + 0.21 \times \text{CEC}^4$
$K_0-1$		$K_0 = 0.14 \times \text{Silt/Sand} - 0.09 \times \text{Clay}^2 + 0.17 \times \text{BD}^3$	$K_0-3$	$K_0 = 0.16 \times \text{Silt/Sand} - 0.03 \times \text{Clay}^2 + 0.15 \times \text{BD}^3 - 0.14 \times \text{CEC}^4$	
n-1		$n = -0.01 \times \text{Silt/Sand} - 0.06 \times \text{Clay}^2 - 0.11 \times \text{BD}^3$	n-3	$n = -0.04 \times \text{Silt/Sand} - 0.14 \times \text{Clay}^2 - 0.09 \times \text{BD}^3 + 0.21 \times \text{CEC}^4$	
$\theta_{wp-2}$		$\theta_{wp} = 0.16 \times \text{Silt/Sand} + 0.4 \times \text{Clay}^2 - 0.07 \times \text{BD}^3 + 0.15 \times \text{FSI}^4$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = 0.07 \times \text{FSI}^3 - 0.14 \times \text{FSI}^2 - 0.10 \times \text{FSI} + 0.14$	
$K_1-2$		$K_1 = -0.21 \times \text{Silt/Sand} + 0.05 \times \text{Clay}^2 - 0.12 \times \text{BD}^3 + 0.08 \times \text{FSI}^4$	$K_1-4$	$K_1 = 0.09 \times \text{FSI}^3 + 0.01 \times \text{FSI}^2 - 0.25 \times \text{FSI} - 0.01$	
$K_0-2$		$K_0 = 0.11 \times \text{Silt/Sand} - 0.09 \times \text{Clay}^2 + 0.15 \times \text{BD}^3 + 0.17 \times \text{FSI}^4$	$K_0-4$	$K_0 = -0.01 \times \text{FSI}^3 - 0.11 \times \text{FSI}^2 + 0.24 \times \text{FSI} + 0.11$	
n-2		$n = -0.04 \times \text{Silt/Sand} - 0.06 \times \text{Clay}^2 - 0.12 \times \text{BD}^3 + 0.2 \times \text{FSI}^4$	n-4	$n = 0.09 \times \text{FSI}^3 + 0.01 \times \text{FSI}^2 - 0.09 \times \text{FSI}$	
6		$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = 0.14 \times \text{Silt/Sand} + 0.15 \times \text{Clay}^2 + 0.04 \times \text{BD}^3$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = 0.15 \times \text{Silt/Sand} + 0.01 \times \text{Clay}^2 + 0.13 \times \text{BD}^3 + 0.58 \times \text{CEC}^4$
		$K_1-1$	$K_1 = -0.06 \times \text{Silt/Sand} + 0.06 \times \text{Clay}^2 - 0.17 \times \text{BD}^3$	$K_1-3$	$K_1 = -0.05 \times \text{Silt/Sand} + 0.08 \times \text{Clay}^2 - 0.18 \times \text{BD}^3 - 0.08 \times \text{CEC}^4$
	$K_0-1$	$K_0 = -0.03 \times \text{Silt/Sand} - 0.09 \times \text{Clay}^2 + 0.32 \times \text{BD}^3$	$K_0-3$	$K_0 = -0.04 \times \text{Silt/Sand} - 0.10 \times \text{Clay}^2 + 0.33 \times \text{BD}^3 + 0.04 \times \text{CEC}^4$	
	n-1	$n = -0.13 \times \text{Silt/Sand} + 0.15 \times \text{Clay}^2 - 0.4 \times \text{BD}^3$	n-3	$n = -0.12 \times \text{Silt/Sand} + 0.16 \times \text{Clay}^2 - 0.41 \times \text{BD}^3 - 0.05 \times \text{CEC}^4$	
	$\theta_{wp-2}$	$\theta_{wp} = 0.18 \times \text{Silt/Sand} + 0.09 \times \text{Clay}^2 - 0.01 \times \text{BD}^3 + 0.42 \times \text{FSI}^4$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = 0.04 \times \text{FSI}^3 - 0.08 \times \text{FSI}^2 + 0.32 \times \text{FSI} + 0.09$	
	$K_1-2$	$K_1 = -0.04 \times \text{Silt/Sand} + 0.09 \times \text{Clay}^2 - 0.14 \times \text{BD}^3 - 0.22 \times \text{FSI}^4$	$K_1-4$	$K_1 = 0.21 \times \text{FSI}^3 - 0.13 \times \text{FSI}^2 - 0.87 \times \text{FSI} + 0.14$	
	$K_0-2$	$K_0 = -0.03 \times \text{Silt/Sand} - 0.09 \times \text{Clay}^2 + 0.33 \times \text{BD}^3 - 0.01 \times \text{FSI}^4$	$K_0-4$	$K_0 = 0.10 \times \text{FSI}^3 - 0.05 \times \text{FSI}^2 - 0.29 \times \text{FSI} + 0.06$	
	n-2	$n = -0.11 \times \text{Silt/Sand} + 0.19 \times \text{Clay}^2 - 0.37 \times \text{BD}^3 - 0.3 \times \text{FSI}^4$	n-4	$n = 0.11 \times \text{FSI}^3 - 0.13 \times \text{FSI}^2 - 0.67 \times \text{FSI} + 0.14$	
	7	$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = -0.27 \times \text{Silt/Sand} + 0.34 \times \text{Clay}^2 + 0.08 \times \text{BD}^3 + 0.11$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = -0.26 \times \text{Silt/Sand} + 0.27 \times \text{Clay}^2 + 0.18 \times \text{BD}^3 + 0.22 \times \text{CEC}^4 + 0.06$
		$K_1-1$	$K_1 = -0.22 \times \text{Silt/Sand} + 0.20 \times \text{Clay}^2 + 0.78 \times \text{BD}^3 - 0.10$	$K_1-3$	$K_1 = -0.22 \times \text{Silt/Sand} + 0.22 \times \text{Clay}^2 + 0.76 \times \text{BD}^3 - 0.06 \times \text{CEC}^4 - 0.09$
$K_0-1$		$K_0 = 0.20 \times \text{Silt/Sand} - 0.15 \times \text{Clay}^2 + 0.32 \times \text{BD}^3 + 0.20$	$K_0-3$	$K_0 = 0.21 \times \text{Silt/Sand} - 0.2 \times \text{Clay}^2 + 0.40 \times \text{BD}^3 + 0.18 \times \text{CEC}^4 + 0.16$	
n-1		$n = -0.19 \times \text{Silt/Sand} + 0.06 \times \text{Clay}^2 - 0.05 \times \text{BD}^3 - 0.20$	n-3	$n = -0.19 \times \text{Silt/Sand} + 0.11 \times \text{Clay}^2 - 0.12 \times \text{BD}^3 - 0.15 \times \text{CEC}^4 - 0.25$	
$\theta_{wp-2}$		$\theta_{wp} = -0.26 \times \text{Silt/Sand} + 0.32 \times \text{Clay}^2 + 0.08 \times \text{BD}^3 + 0.21 \times \text{FSI}^4 + 0.09$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = 0.20 \times \text{FSI}^3 + 0.18 \times \text{FSI}^2 - 0.44 \times \text{FSI} - 0.10$	
$K_1-2$		$K_1 = -0.23 \times \text{Silt/Sand} + 0.25 \times \text{Clay}^2 + 0.80 \times \text{BD}^3 - 0.50 \times \text{FSI}^4 - 0.064$	$K_1-4$	$K_1 = -0.17 \times \text{FSI}^3 - 0.04 \times \text{FSI}^2 + 0.06 \times \text{FSI} + 0.09$	
$K_0-2$		$K_0 = 0.2 \times \text{Silt/Sand} - 0.13 \times \text{Clay}^2 + 0.33 \times \text{BD}^3 - 0.15 \times \text{FSI}^4 + 0.21$	$K_0-4$	$K_0 = -0.002 \times \text{FSI}^3 + 0.05 \times \text{FSI}^2 - 0.16 \times \text{FSI} + 0.15$	
n-2		$n = -0.2 \times \text{Silt/Sand} + 0.09 \times \text{Clay}^2 - 0.04 \times \text{BD}^3 - 0.27 \times \text{FSI}^4 - 0.26$	n-4	$n = -0.02 \times \text{FSI}^3 - 0.12 \times \text{FSI}^2 - 0.17 \times \text{FSI} - 0.11$	
8		$\theta_{wp-1}$	$\theta_{wp} = -0.39 \times \text{Silt/Sand} + 0.45 \times \text{Clay}^2 + 0.09 \times \text{BD}^3$	$\theta_{wp-3}$	$\theta_{wp} = -0.37 \times \text{Silt/Sand} + 0.34 \times \text{Clay}^2 + 0.20 \times \text{BD}^3 + 0.27 \times \text{CEC}^4 - 0.04$
		$K_1-1$	$K_1 = -0.08 \times \text{Silt/Sand} + 0.11 \times \text{Clay}^2 + 0.72 \times \text{BD}^3$	$K_1-3$	$K_1 = -0.1 \times \text{Silt/Sand} + 0.15 \times \text{Clay}^2 + 0.68 \times \text{BD}^3 - 0.1 \times \text{CEC}^4 + 0.01$
	$K_0-1$	$K_0 = -0.06 \times \text{Silt/Sand} + 0.11 \times \text{Clay}^2 + 0.41 \times \text{BD}^3$	$K_0-3$	$K_0 = -0.03 \times \text{Silt/Sand} - 0.01 \times \text{Clay}^2 + 0.52 \times \text{BD}^3 + 0.27 \times \text{CEC}^4 - 0.04$	
	n-1	$n = 0.18 \times \text{Silt/Sand} - 0.29 \times \text{Clay}^2 - 0.19 \times \text{BD}^3$	n-3	$n = 0.15 \times \text{Silt/Sand} - 0.17 \times \text{Clay}^2 - 0.30 \times \text{BD}^3 - 0.28 \times \text{CEC}^4 + 0.04$	
	$\theta_{wp-2}$	$\theta_{wp} = -0.36 \times \text{Silt/Sand} + 0.40 \times \text{Clay}^2 + 0.08 \times \text{BD}^3 + 0.32 \times \text{FSI}^4$	$\theta_{wp-4}$	$\theta_{wp} = 0.23 \times \text{FSI}^3 + 0.07 \times \text{FSI}^2 - 0.32 \times \text{FSI} - 0.32$	
	$K_1-2$	$K_1 = -0.14 \times \text{Silt/Sand} + 0.19 \times \text{Clay}^2 + 0.74 \times \text{BD}^3 - 0.48 \times \text{FSI}^4$	$K_1-4$	$K_1 = -0.17 \times \text{FSI}^3 - 0.05 \times \text{FSI}^2 + 0.05 \times \text{FSI} + 0.1$	
	$K_0-2$	$K_0 = -0.06 \times \text{Silt/Sand} + 0.12 \times \text{Clay}^2 + 0.41 \times \text{BD}^3 - 0.03 \times \text{FSI}^4$	$K_0-4$	$K_0 = -0.02 \times \text{FSI}^3 + 0.04 \times \text{FSI}^2 + 0.03 \times \text{FSI} - 0.03$	
	n-2	$n = 0.14 \times \text{Silt/Sand} - 0.23 \times \text{Clay}^2 - 0.17 \times \text{BD}^3 - 0.37 \times \text{FSI}^4$	n-4	$n = 0.01 \times \text{FSI}^3 - 0.14 \times \text{FSI}^2 - 0.40 \times \text{FSI} + 0.14$	

\* در برآزش مدل‌ها از داده‌های نرمال و استاندارد استفاده شده است.

### نتیجه‌گیری کلی

ورودی‌ها، موجب بهبود معنی‌دار تخمین SMC شد. درحالی‌که در خاک‌های رسی و خاک‌های با قابلیت انبساط بالا تغییر چندانی در بهبود تخمین رطوبت ایجاد نکرد. اما با توجه به اینکه اندازه‌گیری FSI آسان و ارزان‌قیمت هست و در مقابل آن اندازه‌گیری CEC سخت و زمان‌بر است، می‌توان از FSI به‌عنوان تخمین‌گری مناسب جهت تخمین SMC استفاده کرد. در کلاس بافتی لومی استفاده از FSI به‌تنهایی بهترین نتیجه را ایجاد کرد. یعنی در این کلاس بافتی FSI به‌تنهایی بالاترین پتانسیل را برای تخمین SMC داشت و دیگر نیازی به اندازه‌گیری سایر متغیرها مانند CEC و اجزای بافت نیست. بنابراین شاید بتوان با انجام گروه‌بندی و یافتن بهترین تخمین‌گرها برای هر گروه یا کلاس بافتی از صرف وقت و هزینه زیاد برای اندازه‌گیری سایر متغیرها، جهت استفاده به‌عنوان تخمین‌گر، جلوگیری کرد.

در تخمین رطوبت از طریق مدل گرنوالت و گرنیت با رگرسیون خطی و غیرخطی، استفاده از FSI به‌عنوان تخمین‌گر به‌همراه ویژگی‌های پایه و همچنین به‌تنهایی باعث بهبود دقت تخمین‌ها در کل داده‌ها و بیشتر گروه‌های بافتی شد. استفاده از CEC به‌عنوان تخمین‌گر به‌همراه ویژگی‌های پایه خاک نیز باعث بهبود معنی‌دار دقت تخمین‌ها در کل داده‌ها و بیشتر گروه‌های بافتی شد. نکته قابل‌توجه این‌که تأثیر CEC هم در گروه‌های بافتی ریز و هم در گروه‌های بافتی درشت باعث بهبود دقت تخمین‌ها شد. اما تأثیر FSI در بهبود دقت تخمین‌ها در گروه‌های بافتی درشت بیشتر از CEC بود که این برتری FSI را در تخمین رطوبت در گروه‌های بافتی درشت نشان می‌دهد. پس FSI بهتر از CEC توانسته است اثر رس را در نگهداشت رطوبت در این گروه‌های بافتی نشان دهد. شاید در خاک‌های با بافت درشت به‌علت انبساط آزاد کمتر، افزودن FSI و CEC به جمع

### منابع مورد استفاده

- میرخانی ر، شعبانپور م و سعادت س، 1384. استفاده از فراوانی نسبی ذرات و درصد کربن آلی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های استان لرستان. مجله علوم خاک و آب، جلد 19، صفحه‌های 235 تا 242.
- Akaike H, 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control 19: 716-723.
- Alther GR, 1982. The role of bentonite in soil sealing applications. Bulletin of the Association of Engineering Geologists 19: 401-409.
- Arnepalli D, Shanthakumar S, Rao BH and Singh D, 2008. Comparison of methods for determining specific-surface area of fine-grained soils. Geotechnical and Geological Engineering 26: 121-132.
- Asadu CLA and Akamigbo FOR, 1990. Relative contribution of organic matter and clay fractions to cation exchange capacity of soils in southern Nigeria. Samaru. Journal of Agricultural Research 7: 17-23.
- Chapman HD, 1965. Cation-exchange capacity. Pp. 891-901. In: Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Number 9 in the series Agronomy: Am. Inst. Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Chen FH, 1975. Foundations on expansive soils. 280 pp. New York: Elsevier.
- Clapp RB and Hornberger GM, 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. Water Resources Research 14: 601-604.
- Dasog G, Acton D, Mermut A and Jong ED, 1988. Shrink-swell potential and cracking in clay soils of Saskatchewan. Canadian Journal of Soil Science 68: 251-260.
- Dolar B and Trauner L, 2004. Liquid limit and specific surface of clay particles. ASTM Geotechnical Testing Journal 27: 580-584.
- Dolar B and Trauner L, 2005. Impact of soil composition on fall cone test results. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131: 126-130.
- Drake EH and Motto HL, 1982. An analysis of the effect of clay and organic matter content on the cation exchange capacity of New Jersey soils. Soil Science 133: 281-288.
- Franzmeier D, 1991. Estimation of hydraulic conductivity from effective porosity data for some Indiana soils. Soil Science Society of America Journal 55: 1801-1803.
- Fredlund MD, Wilson GW and Fredlund DG, 2002. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 39: 1103-1117.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle-size analysis. Pp. 255-293. Methods of soil analysis. Part 4.

- Grabowska-Olszewska B, 1970. Physical Properties of Clay Soils as a Function of Their Specific Surface. Pp. 405-410. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Congress of the International Association of Engineering Geology.
- Greene-Kelly R, 1974. Shrinkage of clay soils: A statistical correlation with other soil properties. *Geoderma* 11: 243-257.
- Groenevelt PH and Grant CD, 2001. Re-evaluation of the structural properties of some British swelling soils. *European Journal of Soil Science* 52: 469-477.
- Groenevelt P and Grant CD, 2004. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. *European Journal of Soil Science* 5: 479-485.
- Grossman R and Reinsch T, 2002. Bulk density and linear extensibility. Pp. 201-228. In: *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America. USA.
- Haynes R and Naidu R, 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 123-137.
- Hepper EN, Buschiazzi DE, Hevia G, Urioste A and Antón L, 2006. Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. *Geoderma* 135: 216-223.
- Hillel D, 1998. *Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations*, Academic press.
- Holtz WG and Gibbs HJ, 1956. Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 121: 641-663.
- Huang M, Fredlund D and Fredlund M, 2010. Comparison of measured and PTF predictions of SWCCs for loess soils in China. *Geotechnical and Geological Engineering* 28: 105-117.
- Hwang SI and Choi SI, 2006. Use of a lognormal distribution model for estimating soil water retention curves from particle-size distribution data. *Journal of Hydrology* 323: 325-334.
- Jain SK, Singh VP and Van Genuchten MT, 2004. Analysis of soil water retention data using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering* 9: 415-420.
- Keller A, Von Steiger B, Van der Zee S and Schulin R, 2001. A stochastic empirical model for regional heavy-metal balances in agroecosystems. *Journal of Environmental Quality* 30: 1976-1989.
- Khaleel R, Reddy K and Overcash M, 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: A review. *Journal of Environmental Quality* 10: 133-141.
- Leenhardt D, 1995. Errors in the estimation of soil water properties and their propagation through a hydrological model. *Soil Use and Management* 11: 15-21.
- Li MC, 1963. Effect of heat on physico-chemical properties of soil as related to engineering behavior. Pp. 117-120. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Liao K-H, Xu S-H, Wu J-C, Ji S-H and Lin Q, 2011. Assessing soil water retention characteristics and their spatial variability using pedotransfer functions. *Pedosphere* 21: 413-422.
- Manrique L, Jones C and Dyke P, 1991. Predicting cation-exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal* 55: 787-794.
- Mishra AK, Ohtsubo M, Li L and Higashi T, 2011. Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures. *Applied Clay Science* 52: 78-84.
- Mohammadi M and Meskini-Vishkaee F, 2013. Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data. *Pedosphere* 23: 70-80.
- Mohammadi MH and Vanclouster M, 2011b. Predicting the soil moisture characteristic curve from particle size distribution with a simple conceptual model. *Vadose Zone Journal* 10: 594-602.
- Nemes A, Schaap M and Wösten J, 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1093-1102.
- Pachepsky YA and Rawls W, 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1748-1757.
- Rao A, Phanikumar B and Sharma R, 2004. Prediction of swelling characteristics of remoulded and compacted expansive soils using free swell index. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37: 217-226.
- Rawls W, Pachepsky Y A, Ritchie J, Sobecki T and Bloodworth H, 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116: 61-76.
- Reatto A, Bruand A, Silva E, Guégan R, Cousin I, Brossard M and Martins E, 2009. Shrinkage of microaggregates in Brazilian Latosols during drying: significance of the clay content, mineralogy and hydric stress history. *European Journal of Soil Science* 60: 1106-1116.
- Schaap MG, Nemes A and Van Genuchten MT, 2004. Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. *Vadose Zone Journal* 3: 1455-1463.
- Schuh W, Cline R and Sweeney M, 1988. Comparison of a laboratory procedure and a textural model for predicting in situ soil water retention. *Soil Science Society of America Journal* 52: 1218-1227.
- Seybold C, Grossman R and Reinsch T, 2005. Predicting cation exchange capacity for soil survey using linear models. *Soil Science Society of America Journal* 69: 856-863.
- Sillers WS, Fredlund DG and Zakerzadeh N, 2001. Mathematical attributes of some soil—water characteristic curve models. Pp. 243-283. In "Unsaturated Soil Concepts and Their Application in Geotechnical Practice", Springer.
- Sivapullaiah PV, Sitharam TG and Rao K, 1987. Modified free swell index for clays. *ASTM geotechnical testing journal* 10: 80-85.
- Syers JK, Campbell A and Walker T, 1970. Contribution of organic carbon and clay to cation exchange capacity in a chronosequence of sandy soils. *Plant and Soil* 33: 104-112.
- Tietje O and Tapkenhinrichs M, 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 57: 1088-1095.

- Tomasella J, Pachepsky Y, Crestana S and Rawls W, 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1085-1092.
- Vereecken H, Maes J, Feyen J and Darius P, 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science* 148: 389-403.
- Walczak R, 1984. Model studies of dependence between water retention and parameters of solid phase of soils. *Problemy Agrofizyki* 41: 3-69 (in Polish).
- Walczak R, Moreno F, Sławiński C, Fernandez E and Arrue J, 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology* 329: 527-533.
- Warkentin B and Yong R, 1962. Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces. *Clays Clay Miner* 9: 210-218.
- Williams J, Prebble R, Williams W and Hignett C, 1983. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. *Soil Research* 21: 15-32.
- Wösten J, Bouma J and Stoffelsen G, 1985. Use of soil survey data for regional soil water simulation models. *Soil Science Society of America Journal* 49: 1238-1244.
- Wösten J, Pachepsky YA and Rawls W, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of hydrology* 251: 123-150.
- Yukselen-Aksoy Y and Kaya A, 2010. Method dependency of relationships between specific surface area and soil physicochemical properties. *Applied Clay Science* 50: 182-190.
- Zand-Parsa Sh, 2006. Improved soil hydraulic conductivity function based on specific liquid-vapour interfacial area around the soil particles. *Geoderma* 132: 20-30.